

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BETIM  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Wanderley Correa da Silva Junior

**USO DE REDES COMPLEXAS PARA AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA  
DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA BRASILEIRO.**

Betim  
2024

WANDERLEY CORREA DA SILVA JUNIOR

**USO DE REDES COMPLEXAS PARA AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA  
DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA BRASILEIRO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

**Orientador:** Prof. Dr. Leandro Freitas de Abreu

Betim  
2024

## FICHA CATALOGRÁFICA

S586u Silva Junior, Wanderley Correa da  
Uso de redes complexas para avaliação da resiliência do sistema elétrico de potência brasileiro / Wanderley Correa da Silva Junior. – 2024.

42 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2024.

Orientação: prof. Dr. Leandro Freitas de Abreu

1. Sistemas de energia elétrica. 2. Energia elétrica - Transmissão . 3. Energia elétrica - Distribuição . 4. Engenharia de Controle e Automação. I. Wanderley Correa da Silva Junior. II. Título.

Wanderley Correa da Silva Junior

**USO DE REDES COMPLEXAS PARA AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA  
DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA BRASILEIRO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: 25 / 09 / 2024 pela banca examinadora:



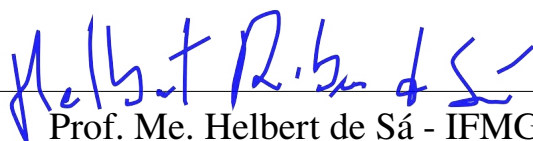
---

Prof. Dr. Leandro Freitas de Abreu (Orientador) - IFMG



---

Prof. Dr. Luis Antonio Aguirre - UFMG



Prof. Me. Helbert de Sá - IFMG

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Rede elétrica brasileira. . . . .	17
Figura 2 – Redes Complexas: a) <i>Scale-Free</i> ; b) <i>Fully Connected</i> ; c) <i>Small-World</i> . . . . .	18
Figura 3 – Esquemático do circuito oscilador de quadratura . . . . .	19
Figura 4 – Esquemático do circuito oscilador de quadratura com o limitador. . . . .	20
Figura 5 – Saída do Oscilador de Quadratura em Diferentes Frequências. . . . .	21
Figura 6 – a) Circuito <i>Buffer</i> ; b) Circuito Somador. . . . .	21
Figura 7 – Medida de estabilidade de um conjunto de SEPs com diferentes distribuição de potências. . . . .	24
Figura 8 – Representação do SEP brasileiro. . . . .	25
Figura 9 – SEP brasileiro representado como uma rede, onde círculos representam agrupamentos de geradores . . . . .	29
Figura 10 – Parâmetro de Ordem vs $R_f$ . . . . .	29
Figura 11 – Perturbação em cada um do Nós. Parâmetro de Ordem vs Frequência da Perturbação. . . . .	31
Figura 12 – Perturbação em 2 nós. Parâmetro de Ordem vs Frequência da Perturbação. . . . .	32
Figura 13 – Perturbação em 4 nós. Parâmetro de Ordem vs Frequência da Perturbação. . . . .	33
Figura 14 – Representação das 2 novas topologias e da topologia original. . . . .	34
Figura 15 – Parâmetro de Ordem vs $R_f$ das 3 topologias. . . . .	34
Figura 16 – Perturbação dos Nós 1,7,8 e 15. . . . .	35
Figura 17 – PCB reduzido do Oscilador de Quadratura. . . . .	36
Figura 18 – Placa de Acoplamento. . . . .	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de Potência e Frequência Final de cada Nó. . . . .	28
Tabela 2 – Valores de Resistência e Capacitância dos componentes usados no oscilador de Quadratura. . . . .	36

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
PCB	Placa de Circuito Impresso
SEP	Sistema Elétrico de Potencia
SMD	Dispositivo de Montagem em Superfície
PTH	Montagem Técnica Através do Furo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>1.1.1</b>	<b><i>Objetivo geral</i> . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>1.1.2</b>	<b><i>Objetivos específicos</i> . . . . .</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa . . . . .</b>	<b>15</b>
<b>1.3</b>	<b>Organização do Texto . . . . .</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Sistema Elétrico de Potencia Brasileiro . . . . .</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Redes Complexas . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>2.3</b>	<b>Oscilador de Quadratura . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>2.4</b>	<b>Circuito <i>Buffer</i> e Circuito Somador . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>2.5</b>	<b>Modelo de Kuramoto . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>2.6</b>	<b>Parâmetro de ordem . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>2.7</b>	<b>Resiliência de Rede . . . . .</b>	<b>23</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Simplificação e Simulação do SEP brasileiro . . . . .</b>	<b>26</b>
<b>3.2</b>	<b>Testes computacionais de resiliência (Perturbação Individual) . . . . .</b>	<b>26</b>
<b>3.3</b>	<b>Testes computacionais de resiliência (Perturbação Múltipla) . . . . .</b>	<b>27</b>
<b>3.4</b>	<b>Projeto da PCB do oscilador de quadratura e da placa de acoplamento . . . . .</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>28</b>
<b>4.1</b>	<b>Simulação Computacional do sistema . . . . .</b>	<b>28</b>
<b>4.2</b>	<b>Simulação Computacional do sistema frente a perturbação (Individual) . . . . .</b>	<b>29</b>
<b>4.3</b>	<b>Simulação Computacional do sistema frente a perturbação (Múltipla) . . . . .</b>	<b>32</b>
<b>4.4</b>	<b>Proposta de Melhoria do Sistema . . . . .</b>	<b>33</b>
<b>4.5</b>	<b>Placa de Circuito Impresso Reduzida do Oscilador de Quadratura . . . . .</b>	<b>35</b>
<b>4.6</b>	<b>Placa de Acoplamento . . . . .</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>38</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>39</b>

<b>APÊNDICE A – SIMULAÇÃO SEP BRASILEIRO . . . . .</b>	<b>41</b>
<b>APÊNDICE B – TESTES DE RESILIÊNCIA NO SEP BRASILEIRO . . . . .</b>	<b>44</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro, com sua vasta extensão territorial e diversidade regional, enfrenta desafios únicos em termos de geração, transmissão e distribuição de energia. A complexidade desse sistema exige abordagens avançadas para sua modelagem e análise, com o objetivo de otimizar a operação e aumentar a resiliência da rede elétrica. O estudo de Rodrigues, Silva e Oliveira (2020) demonstra que a aplicação de redes complexas dinâmicas pode ajudar a identificar e enfrentar os desafios específicos enfrentados pelo SEP, oferecendo novas soluções para melhorar sua eficiência e robustez.

Recentemente, estudos têm explorado as aplicações de sistemas interconectados em diversos campos. Na química, por exemplo, o trabalho de Newman e Girvan (2004) mostrou como esses sistemas podem modelar reações químicas e estruturas moleculares. Na biologia, a pesquisa de ??) revelou como redes neurais podem ser compreendidas através de modelos interligados, oferecendo novos entendimentos sobre a função e organização do cérebro. Na física, o estudo de Barrat, Barthelemy e Vespignani (2008) foi crucial para entender fenômenos como a propagação de doenças e a dinâmica de sistemas de partículas.

O modelo de Kuramoto (KURAMOTO, 1975) é uma ferramenta amplamente utilizada para o estudo de redes complexas. Desenvolvido por Yoshiki Kuramoto, esse modelo é essencial para entender a sincronização em redes de osciladores acoplados, um fenômeno que ocorre tanto em sistemas biológicos, como os ritmos neurais e cardíacos (??), quanto em sistemas físicos, como redes de partículas (PIKOVSKY *et al.*, 2001). De acordo com Acebrón *et al.* (2005), o modelo de Kuramoto oferece uma visão detalhada dos mecanismos que levam à sincronização coletiva, o que é fundamental para analisar a dinâmica de redes complexas, incluindo os sistemas elétricos.

O uso de circuitos eletrônicos para simular redes complexas oferece uma abordagem prática e eficiente para entender o comportamento dessas redes em um ambiente controlado. Esses circuitos podem ser projetados para emular dinâmicas como a propagação de sinais e a sincronização de osciladores, facilitando a experimentação com variáveis e condições que seriam difíceis de testar em sistemas reais (BIKDASH; HARRIS; THOMPSON, 2020). Além disso, como destacado por Viana, Sousa e Lima (2021), circuitos eletrônicos proporcionam uma plataforma valiosa para testar teorias e algoritmos desenvolvidos para redes complexas, facilitando a validação de modelos e a análise de comportamentos emergentes.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 *Objetivo geral*

O Objetivo deste trabalho é avaliar a resiliência às perturbações externas do sistema elétrico brasileiro.

### 1.1.2 *Objetivos específicos*

- Simular numericamente a rede de osciladores que representam o Sistema Elétrico de Potência Brasileiro;
- Realizar experimentos para avaliar o comportamento da rede elétrica frente a perturbações;
- Realizar experimentos para avaliar a resiliência da rede elétrica frente a perturbações;
- Comparar os resultados obtidos com a literatura.
- Projetar uma placa de circuito impresso de tamanho reduzido do oscilador de Quadratura para uso em projetos futuros;
- Projetar uma placa de circuito impresso de uma placa de acoplamento para uso em projetos futuros.

## 1.2 Justificativa

A implementação de redes complexas dinâmicas em circuitos eletrônicos oferece várias vantagens, especialmente no contexto do Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro. Essas redes permitem modelar sistemas complexos de forma mais eficiente do que outras abordagens, como métodos tradicionais baseados em matrizes de incidência, simulações de fluxo de potência estático e modelos simplificados de redes homogêneas. Além disso, as redes complexas dinâmicas facilitam a identificação de padrões e comportamentos não triviais em sistemas complexos. Isso é particularmente útil para lidar com os desafios únicos do SEP no Brasil, como a intermitência de fontes renováveis, a transmissão de longa distância e a vulnerabilidade a falhas em cascata.

## 1.3 Organização do Texto

Este trabalho está organizado da seguinte forma: No Capítulo 2, são explorados os conceitos fundamentais e os trabalhos teóricos que servem de base para o desenvolvimento deste projeto, incluindo discussões sobre sistemas não lineares, redes complexas e o sistema de Kuramoto. O Capítulo 3 descreve a execução das simulações numéricas, explicando também as ferramentas e *softwares* utilizados durante o processo. No Capítulo 4, são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir dessas simulações. Por fim, o Capítulo 5 oferece uma síntese das principais conclusões, além de apontar direções para pesquisas futuras que podem aprofundar ou expandir os resultados alcançados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

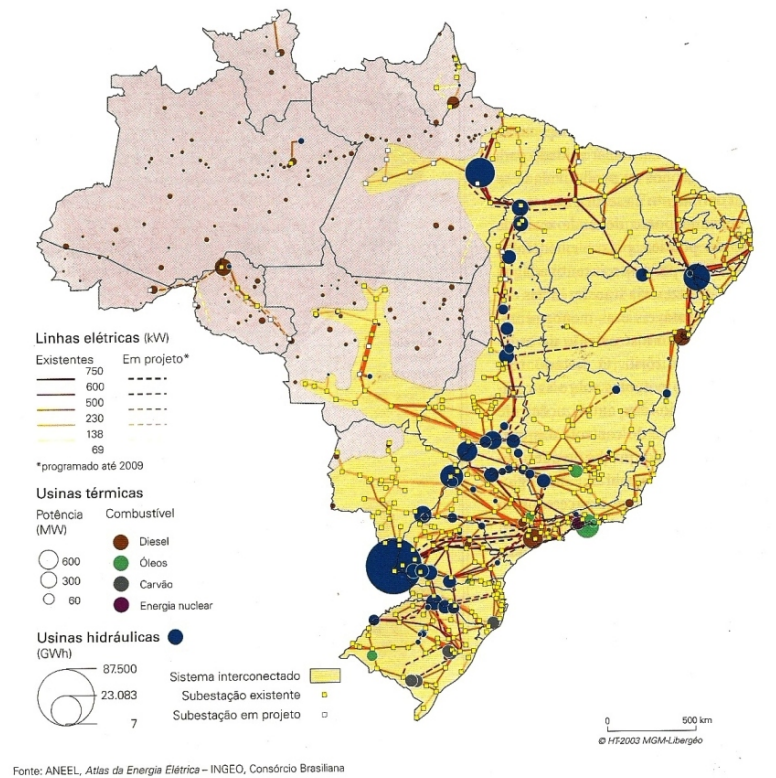
Este trabalho explora temas centrais para a análise de sistemas complexos e eletrônicos, com ênfase no Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro. São discutidos conceitos de redes complexas, que ajudam a entender a estrutura e o comportamento de sistemas interconectados, além da importância do oscilador de quadratura para simulação de maneira prática dos sistemas. O sistema de Kuramoto é abordado como um modelo para estudar a sincronização de osciladores acoplados. Também são analisados os circuitos *buffer* e somador, que desempenham o papel de conexão dos osciladores. O parâmetro de ordem é apresentado como uma medida para avaliar a sincronização em sistemas dinâmicos, e, finalmente, discute-se a resiliência de redes, destacando a capacidade dos sistemas complexos, que são caracterizados por comportamentos emergentes resultantes de interações entre suas partes, de resistir a falhas e perturbações.

### 2.1 Sistema Elétrico de Potencia Brasileiro

O sistema elétrico de potência (SEP) é responsável pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em larga escala. O SEP opera em alta tensão e é controlado por sistemas de proteção e controle para garantir a segurança e confiabilidade do sistema. As principais características incluem a complexidade e a interdependência dos componentes (geradores, transformadores, linhas de transmissão, subestações e redes de distribuição), a necessidade de uma operação coordenada e segura em tempo real e a importância estratégica para a economia e a sociedade como um todo.

O SEP do Brasil é um dos maiores do mundo, com uma capacidade instalada de geração de energia elétrica de mais de 170 GW. Ele é caracterizado por sua grande diversidade geográfica, com centros de geração de energia elétrica localizados em várias regiões do país e conectados por uma rede de transmissão de alta tensão. As principais fontes de energia elétrica do Brasil são a hidrelétrica, térmica e eólica.

Figura 1 – Rede elétrica brasileira.



Fonte: (Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2008).

O sistema elétrico brasileiro constitui uma estrutura complexa composta por diversos elementos, incluindo linhas de transmissão, subestações, usinas geradoras, consumidores e outros dispositivos. As abordagens de sistemas interconectados visam compreender e modelar as relações não triviais entre os distintos elementos de um sistema. No contexto do sistema elétrico brasileiro, isso implica examinar como a falha ou perturbação em uma parte do sistema pode impactar outras áreas, a fim de avaliar a resiliência e a robustez do sistema como um todo.

## 2.2 Redes Complexas

Redes Complexas são estruturas formadas por elementos interconectados que podem ser visualizados como um grafo, onde os elementos são representados por nós, e as ligações entre eles são representadas por arestas. Essas redes podem ter diferentes características, tais como: alta conectividade, interdependência, diversidade e dinamismo.

Newman (2003) revisa os desenvolvimentos no campo dos estudos empíricos de sistemas em rede, como a Internet, redes sociais e redes biológicas. Incluindo conceitos como o efeito de mundo pequeno, distribuições de grau, agrupamento, rede correlações, modelos de grafos aleatórios, modelos de crescimento de rede e ligação preferencial, e processos dinâmicos que ocorrem em redes.

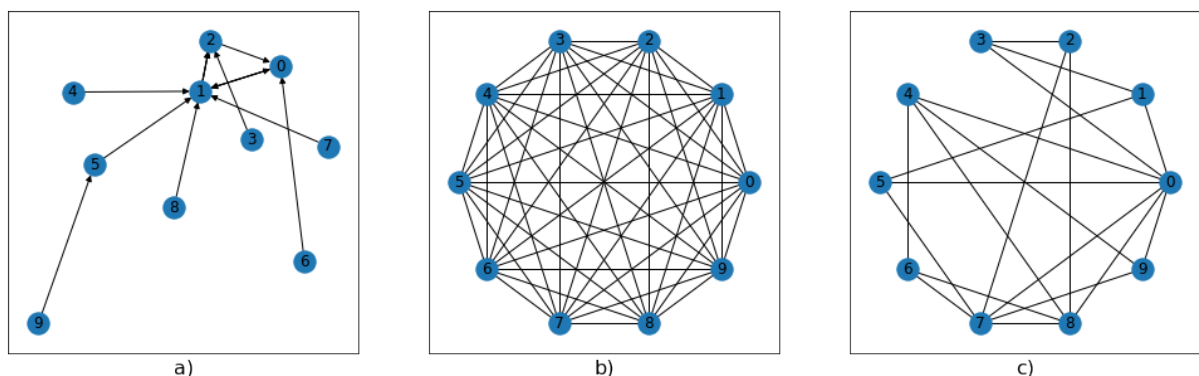
??) explora diversas topologias de redes complexas que ajudam a entender a estrutura e o comportamento de sistemas complexos. Entre elas são discutidas as topologias *Scale-Free*, *Full Connected* e *Small-World*.

Na topologia *Scale-Free* apresentam uma distribuição de graus seguindo a lei de potência, ou seja, poucos nós têm muitas conexões, enquanto a maioria dos nós tem poucas conexões. Exemplificado na Figura 2-a. Essa rede possui robustez a falha aleatória, ou seja, a capacidade de manter sua estrutura e funcionalidade mesmo com a remoção aleatória de alguns nós ou conexões. No entanto, são vulneráveis a ataques direcionados, ou seja, a remoção de nós com alto grau de conectividade pode levar à fragmentação da rede.

A rede *Fully Connected*, conhecida como grafo completo (Figura 2-b), é um tipo de rede em que todos os nós estão conectados diretamente entre si. Uma das principais características das redes completamente conectadas é que elas possuem alta eficiência na transmissão de informações entre os nós, já que não há caminhos intermediários para percorrer.

E por fim a rede em *Small-World*, mostrado na Figura 2-c, é caracterizada pela existência de um caminho médio entre os nós. Essa topologia é comum em muitos sistemas complexos, incluindo redes sociais, redes neurais e redes de transporte. A característica de ter conexões distantes em uma rede *Small-World* pode aumentar a eficiência das comunicações e a rapidez na transmissão de informações. No entanto, essa mesma característica pode tornar a rede mais vulnerável a ataques direcionados a essas conexões-chave.

Figura 2 – Redes Complexas: a) *Scale-Free*; b) *Fully Connected*; c) *Small-World*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Sistema Elétrico de Potência é uma rede complexa porque é formado por muitos componentes interligados, como geradores, transformadores e linhas de transmissão, que interagem entre si. Quando uma parte do sistema falha, isso pode afetar outras áreas de maneira imprevisível, mostrando como tudo está conectado. Além disso, o SEP lida com situações não lineares, onde pequenas mudanças podem causar grandes impactos, e é influenciado por fatores externos, como o clima e a demanda de energia. Para funcionar corretamente, o sistema precisa de coordena-

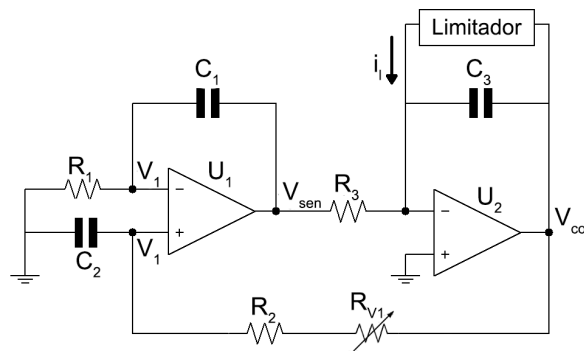
ção constante e monitoramento em tempo real para garantir a segurança e a confiabilidade do fornecimento de energia.

### 2.3 Oscilador de Quadratura

Para construir uma representação de uma rede complexa que simule o Sistema Elétrico Brasileiro, é fundamental, primeiramente, definir quais elementos representarão os nós. Neste contexto, os nós podem corresponder as fontes geradoras do sistema elétrico. Conforme o artigo de Bittencourt *et al.* (2023), o oscilador de quadratura se revelou uma opção eficaz para esse propósito. Este oscilador, não linear, oferece duas variáveis de saída, cosseno e seno. Sua oscilação é estabilizada sem a introdução de distorção excessiva, e a amplitude de saída mantém-se relativamente constante mesmo com alterações na frequência natural.

A Figura 3 apresenta o circuito do oscilador. Ele é constituído por dois circuitos integradores em laço e é concebido de forma a apresentar uma leve discrepância na amplitude da oscilação, a qual é controlada por um circuito limitador de amplitude.

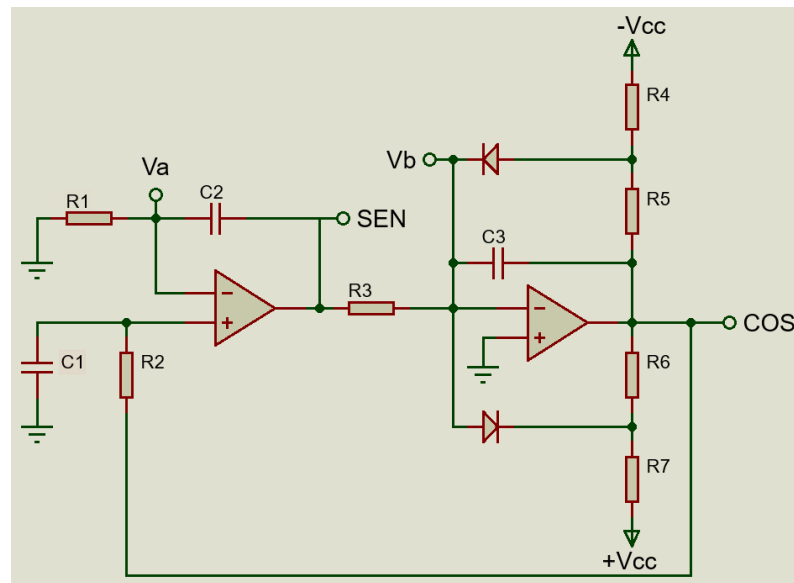
Figura 3 – Esquemático do circuito oscilador de quadratura



Fonte: Adaptado de Graeme, Tobey e Huelsman (1971).

O limitador de amplitude é um circuito constituído por dois diodos e um conjunto de resistores, conforme ilustrado na Figura 4. Quando o módulo da tensão  $V_{\cos}$  ultrapassa um limiar específico, um dos diodos entra em condução, desempenhando o papel de estabilizar as oscilações no circuito.

Figura 4 – Esquemático do circuito oscilador de quadratura com o limitador.



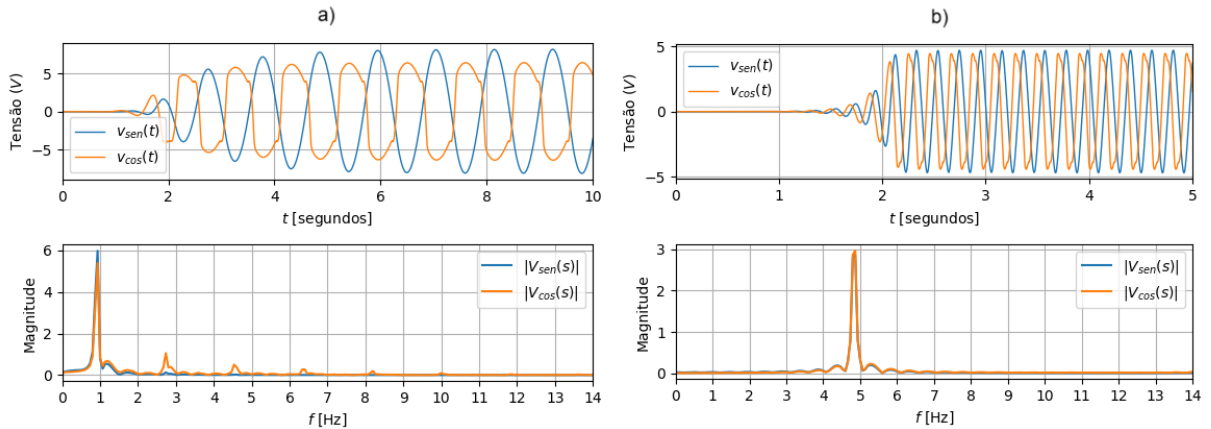
Fonte: Elaborado pelo autor.

Sob a premissa de condições iniciais pequenas (por exemplo, capacitores com carga reduzida), para permitir o aumento da amplitude das oscilações, é necessário que o produto  $R_1C_1$  seja superior ao valor de  $R_2C_2$ . Isso resulta na alocação dos polos do sistema (linearizado) no semiplano direito do plano  $s$ . Além disso, ao ultrapassar um determinado limiar de amplitude, o limitador não linear entra em operação, limitando as oscilações a uma amplitude constante. Ao projetar a resistência de realimentação como uma variável ajustável, torna-se possível ajustar a frequência de oscilação do circuito de acordo com as necessidades específicas. A frequência do circuito é determinada em  $Hz$  por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1C_1R_2C_2}}, \quad (2.1)$$

A Figura 5 apresenta gráficos que ilustram a saída de um oscilador de quadratura em duas situações correspondentes a frequências mínima e máxima apresentada no artigo do Bittencourt *et al.* (2023). Nos gráficos superiores, a tensão ao longo do tempo é mostrada para duas funções,  $V_{sen}(t)$  (linha azul) e  $V_{cos}(t)$  (linha laranja). O primeiro gráfico (a) exibe oscilações periódicas com uma frequência baixa, enquanto o segundo gráfico (b) demonstra um aumento na frequência de oscilação, mantendo a mesma amplitude entre  $-5V$  e  $+5V$ . Os gráficos inferiores mostram a magnitude das transformações de Fourier dessas tensões; o primeiro gráfico apresenta um pico na frequência mínima, indicando a concentração de energia nessa frequência, enquanto o segundo gráfico revela um deslocamento do pico para uma frequência mais alta, sugerindo que a energia do sistema agora está concentrada em uma frequência elevada. Essa comparação ilustra como o oscilador de quadratura responde a diferentes condições de frequência.

Figura 5 – Saída do Oscilador de Quadratura em Diferentes Frequências.



Fonte: Adaptado Bittencourt *et al.* (2023)

As variáveis de estados do oscilador está definida na Equação 2.2 (BITTENCOURT *et al.*, 2023). O vetor de estados é definido como  $x = [V_{sen} \ V_{cos} \ V_1]^T$ , o primeiro colchete destaca a dinâmica do oscilador isolado, e o segundo representa a influência externa. As constantes  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  e  $\tau_3$  estão relacionadas às resistências e capacitâncias do circuito, sendo  $\tau_1 = R_1C_1$ ,  $\tau_2 = R_2C_2$  e  $\tau_3 = R_3C_3$ .

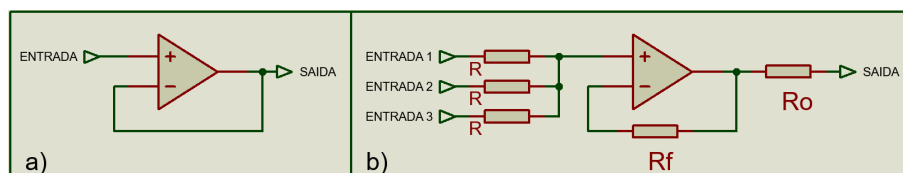
$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_2} v_{cos} + \left( \frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right) v_1 \\ -\frac{1}{\tau_3} v_{sen} - \frac{1}{C_3} I_l \\ \frac{1}{\tau_2} v_{cos} - \frac{1}{\tau_2} v_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R_f}{RR_oC_1} \sum_j v_{sen_j} \\ \frac{R_f}{RR_oC_3} \sum_j v_{cos_j} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

## 2.4 Circuito *Buffer* e Circuito Somador

Para efetuar o acoplamento entre os osciladores, empregou-se um sistema composto por um circuito *buffer* (saída) e um circuito somador (entrada). O circuito *buffer*, ilustrado na Figura 6(a), utiliza um único amplificador operacional. Neste arranjo, o sinal é introduzido pela entrada não inversora (+), com uma realimentação pela entrada inversora (-).

Em contrapartida, o circuito somador, apresentado na Figura 6(b), é constituído por um amplificador operacional. Nele, os sinais a serem somados são direcionados para a entrada não inversora, atravessando um resistor ( $R$ ). A realimentação ocorre pela entrada inversora, utilizando outro resistor ( $R_f$ ). Ao final, a saída do circuito é conduzida por meio de mais um resistor ( $R_o$ ).

Figura 6 – a) Circuito *Buffer*; b) Circuito Somador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 2.5 Modelo de Kuramoto

O modelo de Kuramoto é amplamente valorizado no estudo de redes complexas devido à sua simplicidade e versatilidade em descrever a sincronização em diversas topologias. Sua aplicação abrange áreas como física, biologia, engenharia de controle, comunicações e sistemas de energia, conforme discutido por Pikovsky e Rosenblum (2015) e Gradowski e Krawiecki (2020). Pikovsky e Rosenblum (2015) revisam a aplicação do modelo de Kuramoto na sincronização de sistemas não lineares, enquanto Gradowski e Krawiecki (2020) discutem suas aplicações em engenharia, comunicações e sistemas de energia, destacando sua versatilidade e impacto na teoria das redes complexas. A simplicidade do modelo facilita análises matemáticas, tornando-o uma ferramenta valiosa para compreender a dinâmica coletiva e os padrões emergentes em sistemas complexos.

O modelo de Kuramoto (KURAMOTO, 1975) foi criado para descrever sincronização entre sistemas. Cada um dos osciladores é considerado como tendo sua própria frequência natural ( $\omega_i$ ) e cada um é acoplado de uma determinada maneira a outros osciladores. Sua equação é dada por:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \frac{k}{N} \sum \text{sen}(\theta_j - \theta_i), \quad (2.3)$$

em que  $\omega_i$  representa a frequência natural, que é a frequência na qual um sistema tende a oscilar na ausência de qualquer força motriz ou de amortecimento, do oscilador analisado;  $\theta_i$  representa a fase do  $i$ -ésimo oscilador analisado;  $\theta_j$  representa a fase do  $j$ -ésimo oscilador, acoplado ao analisado;  $N$  representa o número de osciladores conectados e  $k$  representa a força de acoplamento. O modelo de Kuramoto é importante porque fornece uma descrição matemática simples e elegante de como a sincronização ocorre em sistemas complexos.

## 2.6 Parâmetro de ordem

O parâmetro de ordem é uma medida fundamental que avalia o grau de sincronização em sistemas de osciladores acoplados (STROGATZ, 2000). No contexto dos osciladores de Kuramoto, esse parâmetro é uma medida complexa que representa a média ponderada das fases dos osciladores, levando em consideração a intensidade do acoplamento entre eles. Ele é amplamente empregado na teoria de sistemas dinâmicos e em pesquisas sobre sincronização.

A equação do parâmetro de ordem é dada por:

$$re^{i\psi(t)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j(t)}, \quad (2.4)$$

$re^{i\psi(t)}$  é definido como a média dos fasores  $e^{i\theta_j(t)}$ , onde  $\theta_j(t)$  é a fase do  $j$ -ésimo oscilador no tempo  $t$ , e  $N$  é o número total de osciladores no sistema. O módulo  $r$  representa a coerência ou

sincronização dos osciladores, enquanto o argumento  $\psi(t)$  representa a fase média.

## 2.7 Resiliência de Rede

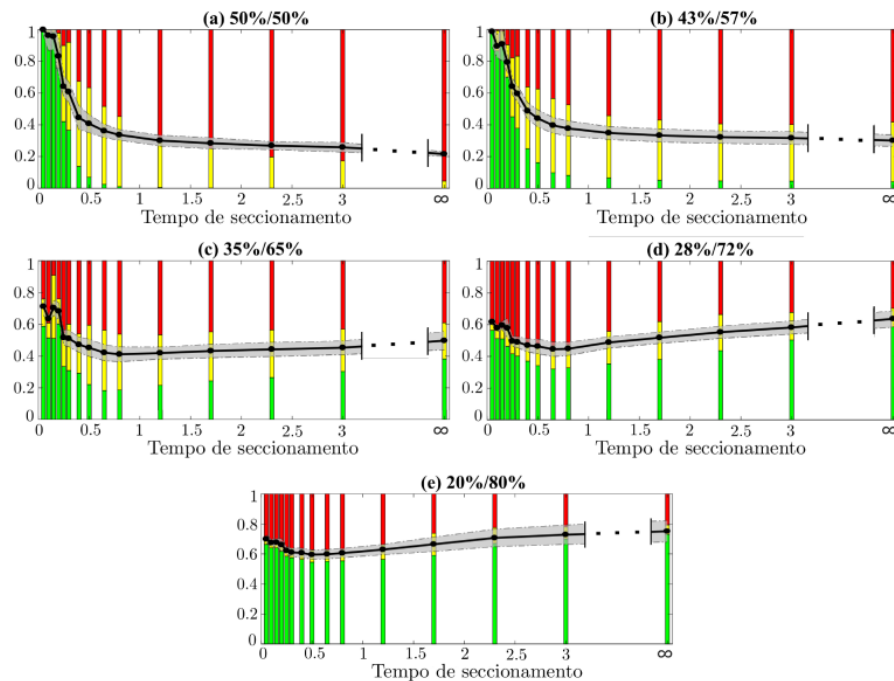
A resiliência de rede dinâmica abrange a habilidade de uma rede se ajustar e se recuperar de falhas, ataques ou interrupções de maneira ágil e eficaz. Isso implica em detectar problemas, reconfigurar-se automaticamente, redistribuir o tráfego e manter a conectividade, mesmo em condições adversas. Esta abordagem é especialmente crucial em ambientes onde a confiabilidade e a disponibilidade da rede são vitais, tais como sistemas de comunicação de emergência, redes de serviços públicos (como energia, água, transporte) e sistemas de saúde, entre outros.

O artigo "Resiliência de Redes de Kuramoto: uma Aplicação a Sistemas Elétricos de Potência", (MOREIRA, 2019) explora a aplicação do modelo de redes complexas de Kuramoto na análise e melhoria da resiliência de sistemas elétricos de potência. O estudo destaca a importância da resiliência para garantir a estabilidade e confiabilidade desses sistemas diante de falhas ou perturbações. Utilizando o modelo de Kuramoto de 2ª ordem, os autores propõem estratégias para otimizar a resiliência das redes elétricas, incluindo a identificação de pontos críticos, a implementação de medidas de contingência e a análise de cenários extremos. Os resultados apresentados no artigo demonstram a eficácia dessas abordagens na promoção da resiliência e na mitigação de possíveis impactos adversos em sistemas elétricos de potência.

Moreira (2019) mostram a importância da heterogeneidade na rede para sua resiliência. A heterogeneidade em redes dinâmicas envolve nós e conexões com características diversas, como diferença de frequências e variações de amplitude, influenciando o comportamento e a resiliência frente a falhas. Gerenciar essa heterogeneidade é crucial para otimizar o desempenho do sistema. Ao simular diversas topologias similares ao SEP brasileiro de cinco maneiras diferentes, observou-se que redes mais heterogêneas são mais resistentes a perturbações.

Na Figura 7, a medida de estabilidade da bacia de um conjunto de SEPs com distribuições de potência ( $X\%$ ,  $Y\%$ ) é representada para diferentes valores de tempo de seccionamento (eixo x). Para cada valor de tempo de seccionamento, os nós são classificados de acordo com sua medida de estabilidade. O eixo y mostra a proporção de nós com alta (verde), média (amarelo) e baixa (vermelho) resiliência. A média da estabilidade da bacia é representada pela linha sólida, com  $\pm 3$  desvios-padrão (em cinza), também em uma escala de [0, 1] no eixo y. A Figura 7 mostram que, embora redes homogêneas sejam melhores em resolução rápida de perturbações, ao longo do tempo, redes mais heterogêneas mantêm maior estabilidade após a eliminação das perturbações.

Figura 7 – Medida de estabilidade de um conjunto de SEPs com diferentes distribuição de potências.



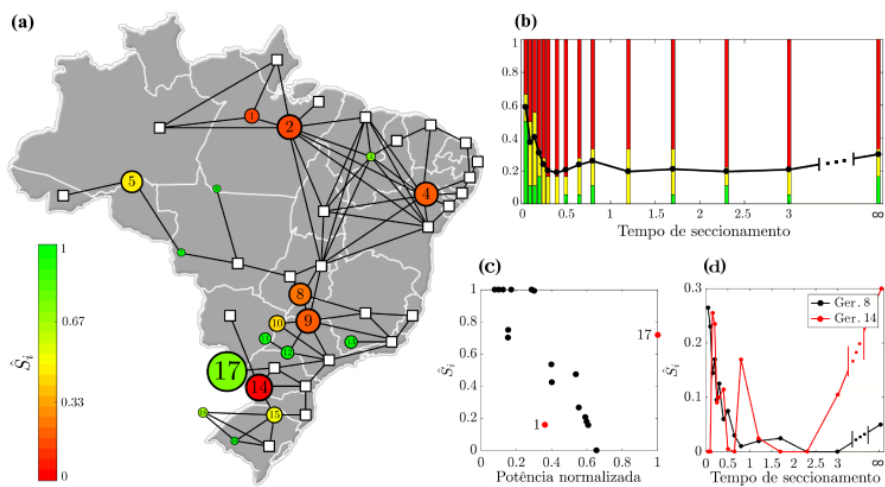
Fonte: (MOREIRA, 2019)

Foi realizado também um teste de estabilidade com a topologia simplificada do sistema elétrico brasileiro mais próxima do real, apresentado na Figura 8.

Na Figura 8(a), o Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro é ilustrado com geradores representados por círculos e cargas por quadrados. O tamanho dos geradores é proporcional à potência fornecida, enquanto as cargas têm o mesmo tamanho devido à distribuição uniforme da demanda. As cores dos geradores indicam a estabilidade da bacia correspondente. No painel (b) da mesma figura, apresenta-se a medida de estabilidade da bacia do SEP. No painel (c), a estabilidade é mostrada em função da potência normalizada, com *outliers* destacados em vermelho. Por fim, na Figura 8(d), a estabilidade é plotada em relação ao tempo de seccionamento para dois nós do sistema.

Observa-se que a rede elétrica tende a se comportar de maneira semelhante a uma rede homogênea, pois demonstra maior estabilidade em condições de tempos de seccionamento mais curtos. A Figura 8-a também identifica quais geradores possuem maior resiliência (em verde) e quais são mais suscetíveis a falhas (em vermelho).

Figura 8 – Representação do SEP brasileiro.



Fonte: (MOREIRA, 2019)

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, será abordada a simplificação e simulação do Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro, detalhando os processos utilizados para modelar e reduzir a complexidade do sistema. Em seguida, descreveremos os testes computacionais de resiliência, começando com perturbações individuais em nós específicos e, posteriormente, perturbando múltiplos nós simultaneamente para avaliar a robustez do sistema. Além disso, será apresentado o projeto da PCB do oscilador de quadratura, juntamente com o projeto da placa de acoplamento.

#### 3.1 Simplificação e Simulação do SEP brasileiro

Devido à extensão e diversidade da malha elétrica brasileira, realizar uma simulação abrangente e uma montagem prática do sistema completo é uma tarefa desafiadora. Para contornar essa dificuldade, recorreu-se à simplificação proposta por Moreira (2019) presente na Figura 8. Ela representa as principais fontes geradoras e cargas do território brasileiro, juntamente com suas conexões. Para a simulação, desconsiderou-se as cargas do sistema e cada fonte geradora foi modelada como um oscilador de quadratura, onde a frequência estava relacionada à potência gerada.

Além disso, para compreender o comportamento da rede elétrica, como por exemplo, se ela entra em sincronismo e em que valor de força de acoplamento isso ocorre, que indica o grau de interação entre os componentes e como eles afetam uns aos outros durante a operação, foi desenvolvido um código em *Python* (Apêndice A). Este *script* simula o sistema para diferentes valores do resistor  $R_f$ , dado que a variação de  $R_f$  influencia a força de acoplamento. Cada nó da rede é modelado com base nas equações do oscilador de quadratura (BITTENCOURT *et al.*, 2023). Ao final da simulação, o código calcula a diferença de fase entre os osciladores para cada valor de resistência, permitindo verificar se estão sincronizados ou não.

#### 3.2 Testes computacionais de resiliência (Perturbação Individual)

Após determinar os valores de acoplamento adequados, foi escolhido um valor específico em que o sistema permanecia sincronizado. Esse valor foi utilizado como base para a aplicação das perturbações. Para introduzir a perturbação no sistema, foi conectado mais um oscilador de forma unidirecional, onde apenas a perturbação influencia e o nó afetado recebe. A perturbação foi aplicada a cada nó individualmente, variando sistematicamente sua frequência. Durante esse processo, a resistência da rede foi avaliada em resposta aos sinais de perturbação, permitindo uma análise detalhada da robustez e estabilidade do sistema frente a diferentes condições de operação. Após a obtenção dos resultados, os osciladores foram divididos em dois grupos: um composto pelos nós que apresentaram menor perda de sincronismo (mais fortes) e outro pelos que exibiram maior perda de sincronismo (mais fracos).

Essa simulação foi realizada utilizando a linguagem *Python*, com o auxílio das bibliotecas *NumPy*, *SciPy* e *Matplotlib*. Essas bibliotecas fornecem, respectivamente, operações eficientes com *arrays* e cálculos numéricos, ferramentas avançadas para ciência e engenharia, e criação de gráficos e visualizações de dados.

Para a análise de perturbação, o código usado (Apêndice B) realiza experimentos simulando um sistema de osciladores acoplados para diferentes valores de resistência  $R_2$  do nó perturbado, o que determina a frequência da própria perturbação. O código então calcula o parâmetro de ordem do sistema, que mede a sincronização dos osciladores.

### 3.3 Testes computacionais de resiliência (Perturbação Múltipla)

Utilizando o código presente no Apêndice B, foram realizados novos testes de perturbação, desta vez em mais de um nó simultaneamente. A única modificação no código foi na matriz de acoplamento, permitindo que a perturbação se conectasse a vários pontos ao mesmo tempo. Inicialmente, dois nós foram perturbados simultaneamente. Os pares foram selecionados com base nos resultados dos testes de perturbação individual. Foram realizados testes perturbando dois nós resistentes à perturbação, dois nós vulneráveis e uma combinação desses nós. Por fim, foi feito um teste perturbando quatro nós ao mesmo tempo, mesclando nós fortes e fracos em relação à perturbação.

### 3.4 Projeto da PCB do oscilador de quadratura e da placa de acoplamento

Para trabalhos futuros, considerando que a simulação do SEP brasileiro precisa de um número significativamente maior de nós (cerca de 18), é necessário reduzir as placas ao menor tamanho possível. Para isso, utilizamos componentes SMD mais compactos e organizamos os pinos de medição, conexão e alimentação em apenas um dos lados. O principal objetivo é criar um circuito compacto para o oscilador.

Conectar vários osciladores em *protoboards* não é apenas uma tarefa extremamente minuciosa e desafiadora, mas também aumenta significativamente o risco de erros de montagem e problemas de mau contato. Podendo levar a falhas intermitentes e dificultar a detecção de problemas, tornando o processo ainda mais propenso a falhas. Para isso, foi desenvolvida uma placa denominada "Placa de Acoplamento", que possui uma entrada específica para cada oscilador, uma vez que cada oscilador terá sua própria placa de acoplamento. Além disso, é necessário espaço para a instalação de resistores ou potenciômetros, a fim de ajustar a força do acoplamento, e a capacidade de ampliar o número de conexões sem complicar excessivamente a montagem, se necessário.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Simulação Computacional do sistema

A relação da potência de cada nó em relação à potência total do sistema foi utilizada como referência para determinar a frequência de cada nó. Utilizando os dados fornecidos nos códigos de trabalho de Moreira (2019), essas frequências foram calculadas com base na equação (4.1), na qual a porcentagem de geração de cada gerador foi subtraída da frequência base de 60 Hz do respectivo nó. Os valores resultantes foram tabulados na Tabela 1.

$$\text{Frequência Final do nó } N = 60 \text{ Hz} \times (1 - \text{Relação de potência do nó } N) \quad (4.1)$$

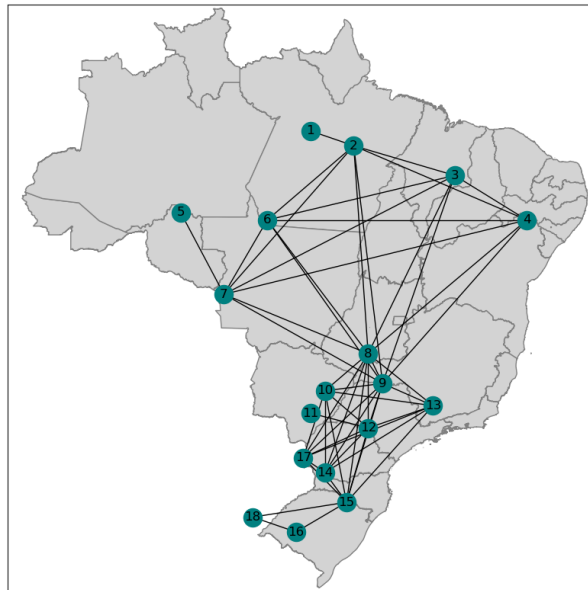
Tabela 1 – Relação de Potência e Frequência Final de cada Nó.

Nó	Relação de Potência	Frequência Final (Hz)
1	0,051	56,94
2	0,086	54,84
3	0,022	58,68
4	0,083	55,02
5	0,075	55,50
6	0,018	58,92
7	0,011	59,34
8	0,078	55,32
9	0,084	54,96
10	0,057	56,58
11	0,025	58,50
12	0,042	57,48
13	0,041	57,54
14	0,092	54,48
15	0,056	56,64
16	0,015	59,10
17	0,140	51,60
18	0,022	58,69

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 9 apresenta uma representação simplificada do Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro, destacando as conexões diretas entre os nós do sistema, que representam as fontes geradoras da rede elétrica.

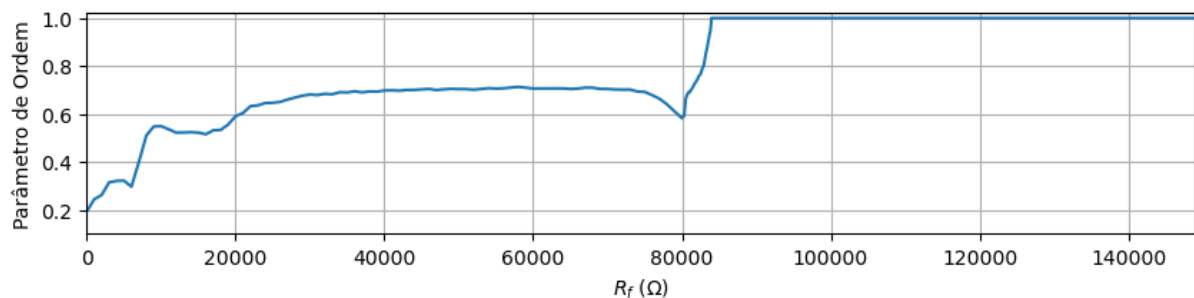
Figura 9 – SEP brasileiro representado como uma rede, onde círculos representam agrupamentos de geradores



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após determinar a frequência de cada nó, o sistema foi simulado e um gráfico de  $R_f$  por Parâmetro de Ordem foi gerado, com  $R_f$  variando de 0  $\Omega$  até 140  $k\Omega$ .

Figura 10 – Parâmetro de Ordem vs  $R_f$  .



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sistema alcança sincronização, com um parâmetro de ordem igual a 1, para valores de  $R_f$  acima de 83940  $\Omega$ . No entanto, pode-se considerar que o sistema está em sincronização quando o parâmetro de ordem excede 0,9, o que ocorre para valores de  $R_f$  acima de 83600  $\Omega$ .

## 4.2 Simulação Computacional do sistema frente a perturbação (Individual)

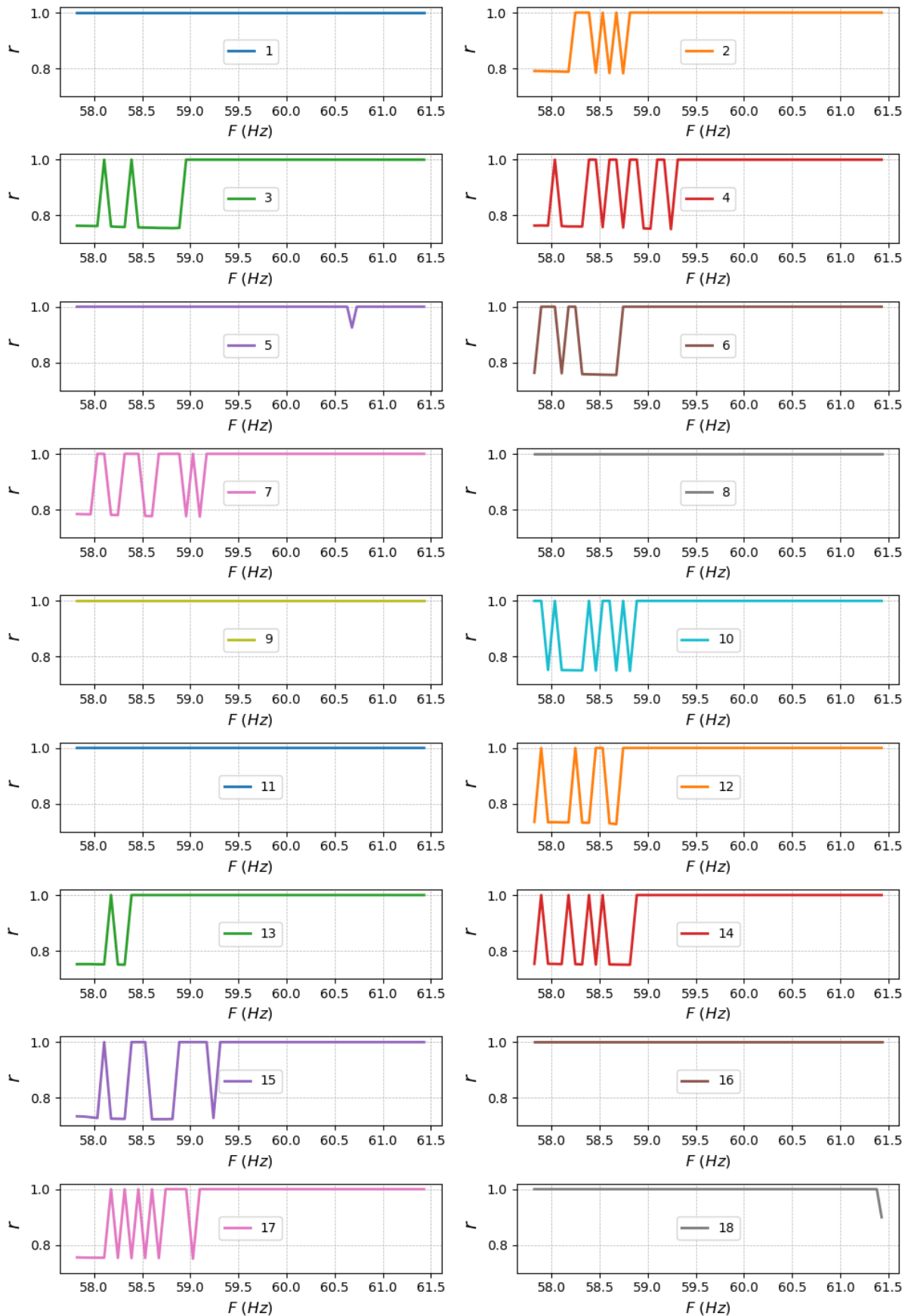
Para realizar a simulação do sistema frente a perturbações, foi selecionado o valor de  $R_f$  igual a 83939  $\Omega$ , sendo esse o primeiro valor onde o sistema entra em pleno sincronismo ( $r \approx 1$ ). No entanto, ao realizar os experimentos, percebeu-se que qualquer perturbação, mesmo com

frequências muito diferentes dos nós e com uma grande força de acoplamento, não fazia o sistema perder o sincronismo em nenhum dos 18 nós. Isso sugere que, quando o valor do parâmetro de ordem é exatamente 1, o sistema atinge um ponto crítico ou um estado de sincronização. Nesse estado, o sistema pode estar em equilíbrio dinâmico, onde as perturbações são absorvidas ou dissipadas de maneira a não causar dessincronização.

Em seguida, foi escolhido o valor de  $R_f$  igual a  $83938 \Omega$ , onde a ordem de parâmetro é igual a  $0,98728066$ . O experimento foi realizado com esse valor, e os dados obtidos estão contidos na Figura 11.

Após a realização dos experimentos, notou-se que os nós com menor grau de conexão (Nós 1, 5, 11, 16 e 18) e os com maior grau (Nós 8 e 9) são os mais resistentes a perturbações. Além de manter o sistema sincronizado, o valor da coerência de fase do sistema se mantém em 1. Nós com menos conexões têm uma dinâmica geralmente mais simples, tornando-os menos suscetíveis a interações complexas e instabilidades. Já os nós altamente conectados recebem suporte de muitos outros nós, proporcionando redundância que ajuda a absorver e dissipar perturbações.

Figura 11 – Perturbação em cada um do Nós. Parâmetro de Ordem vs Frequência da Perturbação.



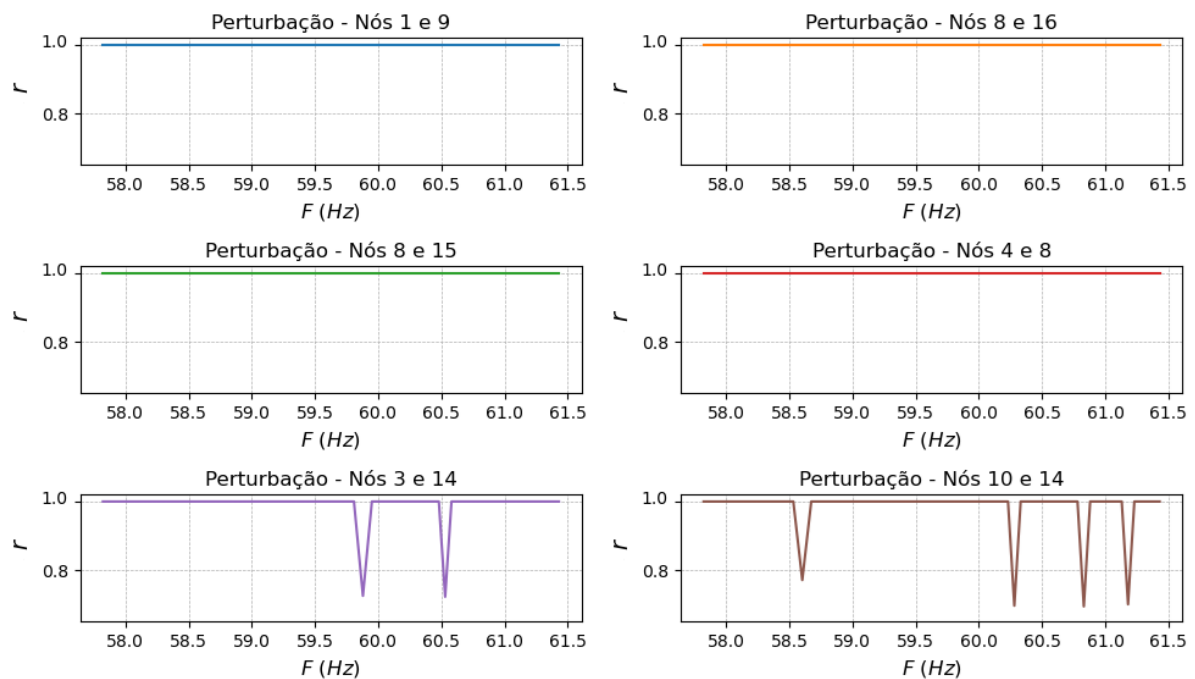
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.3 Simulação Computacional do sistema frente a perturbação (Múltipla)

Com base nos resultados dos experimentos de perturbação individual, foram selecionados pares de nós para realizar os testes múltiplos. Foram escolhidas duas duplas de nós resistentes à interferência (nós 1 e 9, nós 8 e 16), duas duplas onde um nó é robusto e o outro é vulnerável (nós 8 e 15, nós 4 e 8), e, por fim, duas duplas de nós suscetíveis à perturbação (nós 3 e 14, nós 10 e 14).

Como mostrado na Figura 12, ao aplicar perturbações em múltiplos nós, o sistema tende a se manter mais resiliente. A dupla mista permanece sincronizada, enquanto a dupla vulnerável apresenta alguns pontos de dessincronização, mas em uma quantidade significativamente menor em comparação com as perturbações individuais.

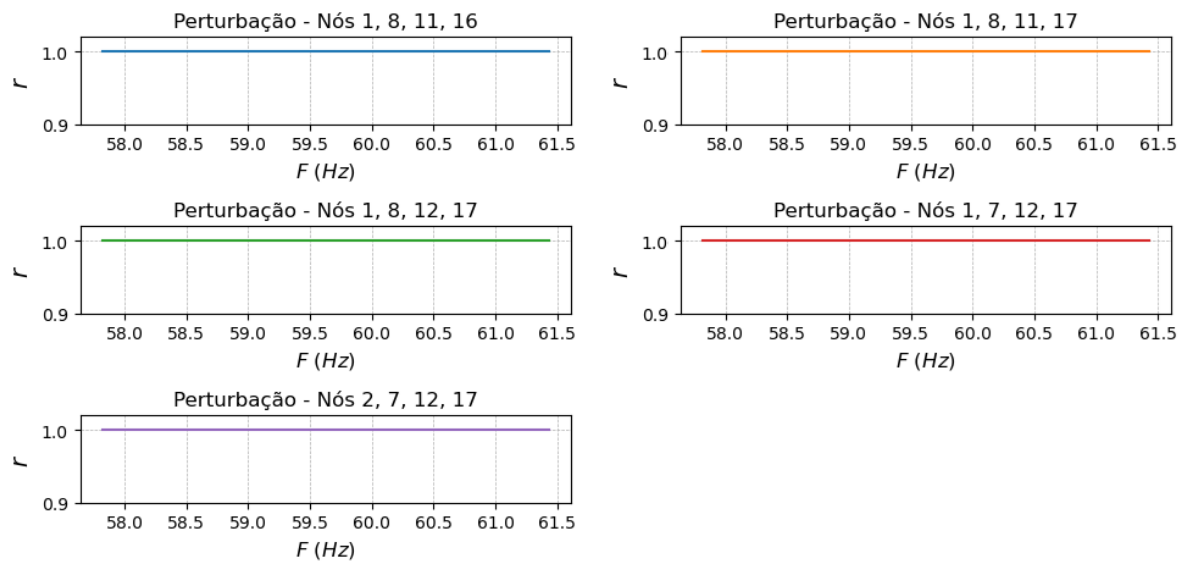
Figura 12 – Perturbação em 2 nós. Parâmetro de Ordem vs Frequência da Perturbação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa resistência torna-se ainda mais evidente quando quatro nós são perturbados simultaneamente. A Figura 13 ilustra testes realizados combinando nós fortes e fracos, e, em todas as situações, o sistema permaneceu sincronizado. Embora a perturbação em múltiplos nós não tenha causado problemas de sincronismo na rede, observa-se que a perturbação inserida começa a exercer maior influência, fazendo com que os osciladores sigam mais o seu comportamento do que o dos demais nós.

Figura 13 – Perturbação em 4 nós. Parâmetro de Ordem vs Frequência da Perturbação.



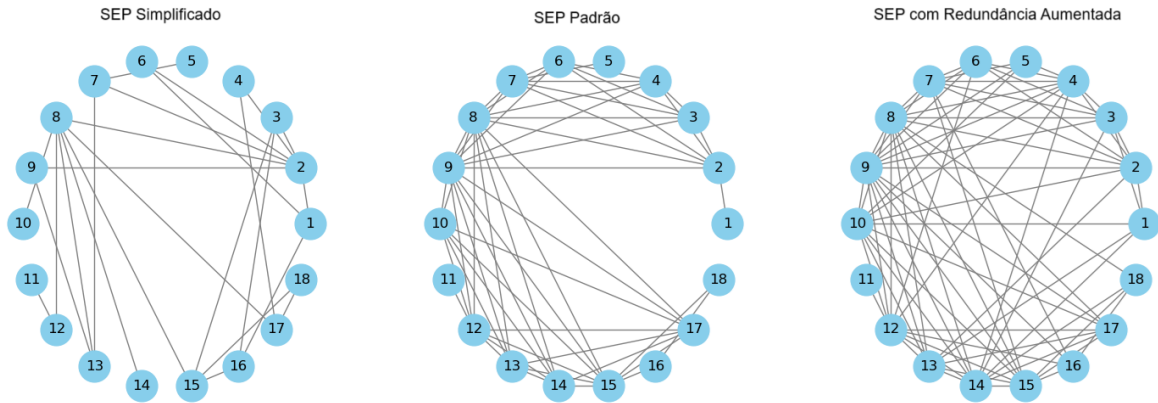
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 Proposta de Melhoria do Sistema

Com base nos resultados dos testes de perturbação individual (secção 4.2) e múltipla (secção 4.3), verificou-se que os nós com menor e maior número de conexões exibem uma resistência maior à perturbação. Isso sugere que a resiliência do Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro pode ser aprimorada ao adotar uma de duas estratégias principais. A primeira consiste em simplificar a rede, eliminando conexões que se mostram redundantes. A segunda abordagem envolve o aumento do número de conexões entre os nós, criando uma estrutura mais redundante.

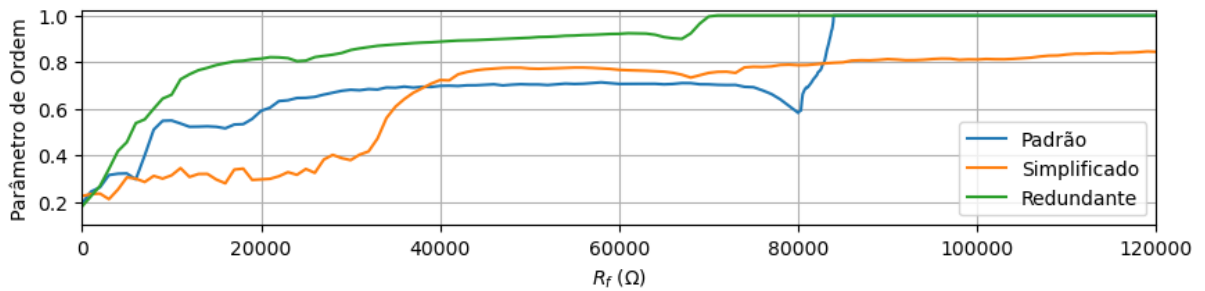
Para validar se essas melhorias são eficazes, foram propostas duas novas topologias conforme figura 14. Inicialmente, realizou-se a simulação do sistema (Figura 15), calculando a ordem do parâmetro para cada valor de  $R_f$ , o que indica a força de acoplamento do sistema.

Figura 14 – Representação das 2 novas topologias e da topologia original.



Fonte: Elaborado pelo autor.

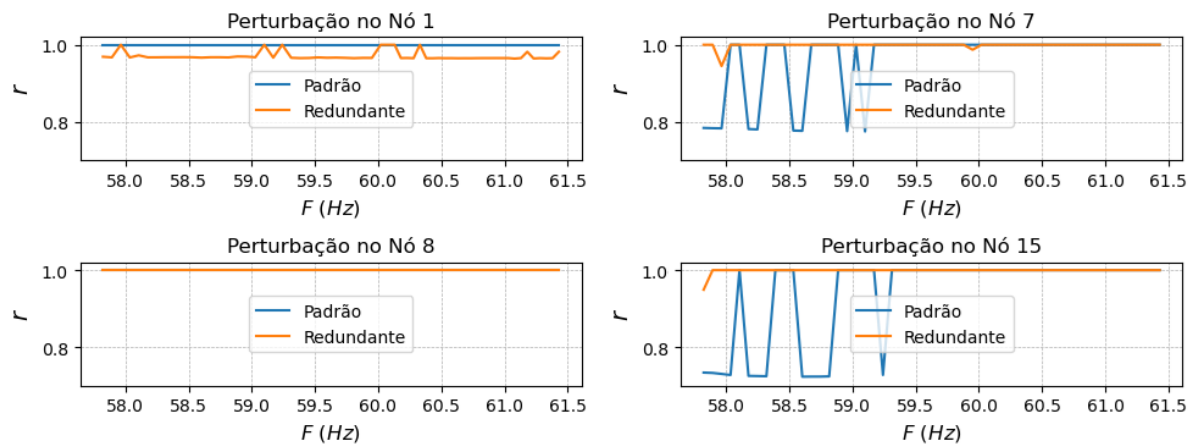
Figura 15 – Parâmetro de Ordem vs  $R_f$  das 3 topologias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a simulação inicial apresentada na figura 15, constatou-se que simplificar a rede pode impedir o sistema de entrar em sincronismo, o que é um problema sério. Diante disso, prosseguiu-se com o teste de perturbação utilizando apenas o sistema mais redundante, já que ele consegue alcançar o sincronismo. Na simulação de perturbação (Figura 16) desta nova topologia, os nós 1, 7, 8 e 15 foram perturbados separadamente, e os resultados foram comparados com os da topologia inicial (Padrão).

Figura 16 – Perturbação dos Nós 1,7,8 e 15.



Fonte: Elaborado pelo autor.

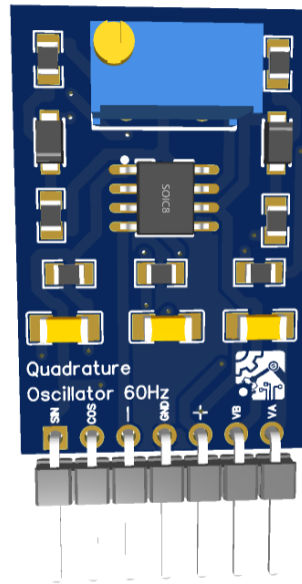
Ao analisar os resultados mostrados na Figura 16, observou-se que tornar a rede mais redundante a tornou mais resistente a perturbações, especialmente nos nós que antes eram mais vulneráveis. No entanto, ao avaliar os resultados do nó 1, ocorreu o oposto: a maior redundância causou uma perda maior de sincronismo. Isso sugere que, embora aumentar o número de conexões geralmente melhore a resistência da rede, isso precisa ser feito de forma cuidadosa, pois conexões adicionais podem sobrecarregar ou desestabilizar nós críticos. No caso do nó 1, o aumento de conexões pode ter gerado uma "competição" entre diferentes sinais, prejudicando o sincronismo, em vez de fortalecê-lo. Portanto, é essencial planejar as conexões para evitar que a robustez da rede como um todo comprometa o desempenho de nós específicos.

#### 4.5 Placa de Circuito Impresso Reduzida do Oscilador de Quadratura

A PCB do Oscilador de Quadratura foi desenvolvida com três metas principais, como a redução do tamanho da placa, o aumento da frequência de saída para aproximadamente 60 Hz e a garantia de fácil acesso aos pontos  $V_a$  e  $V_b$  do circuito (Figura 4). Para alcançar a meta de aumentar a frequência de saída, foram ajustados os valores dos componentes, conforme detalhado na Tabela 2. A validação do circuito foi realizada por meio de simulações no *software Proteus*, onde foi possível obter valores de frequência na faixa de aproximadamente 50 Hz a 62 Hz.

Para facilitar o acesso aos pontos desejados, implementou-se uma barra de pinos que inclui as conexões de alimentação do circuito (+15V, GND, -15V), pontos de medição (Seno e Cosseno) e pontos para o acoplamento ( $V_a$  e  $V_b$ ). Finalmente, a nova placa (Figura 17) possui dimensões compactas, medindo 2 cm de largura por 3 cm de comprimento.

Figura 17 – PCB reduzido do Oscilador de Quadratura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.6 Placa de Acoplamento

Para simplificar o acoplamento entre os osciladores, foi desenvolvida a placa de Acoplamento. Ela apresenta um *socket* para a inserção de um amplificador operacional TL074, que possui 4 amplificadores operacionais. Além disso, inclui uma linha de bornes destinada à conexão com um oscilador, com pinos organizados para permitir 5 conexões de entrada e 5 de saída.

Em relação aos resistores necessários para o circuito somador (conforme a Figura 6), foram incorporados bornes projetados para receber resistores fixos ou potenciômetros. Essa abordagem

Tabela 2 – Valores de Resistência e Capacitância dos componentes usados no oscilador de Quadratura.

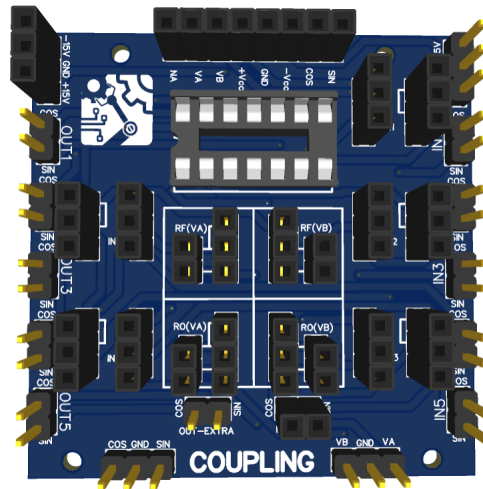
Componente	Valor
$R_1$	10 $k\Omega$
$R_2$	12 $k\Omega$
$R_3$	12 $k\Omega$
$R_4$	22 $k\Omega$
$R_5$	4,7 $k\Omega$
$R_6$	4,7 $k\Omega$
$R_7$	22 $k\Omega$
$C_1$	220 $nF$
$C_2$	220 $nF$
$C_3$	220 $nF$
$R_{V1}$	100 $k\Omega$

Fonte: Elaborado pelo autor.

foi adotada visando proporcionar maior flexibilidade nas conexões, bem como permitir a variação nos valores de acoplamento de força para cada conexão.

Por fim, a placa dispõe de pinos de alimentação nas laterais e pinos de medição e ampliação na base inferior. Esses recursos ampliam significativamente o número de conexões possíveis, proporcionando maior versatilidade ao projeto.

Figura 18 – Placa de Acoplamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5 CONCLUSÃO

A análise realizada neste estudo reforça a importância das simulações na compreensão do comportamento dinâmico do Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro, modelado como uma rede de osciladores.

Nos experimentos computacionais que avaliaram a resposta da rede frente a perturbações individuais, observou-se que os nós com menor grau de conexão, assim como os altamente conectados, demonstraram maior resistência. A menor complexidade dinâmica dos nós com poucas conexões, junto à abundância de interligações nos nós mais conectados, parece conferir maior robustez à rede. Esses resultados indicam que tanto a simplicidade quanto a multiplicidade de conexões desempenham papéis cruciais na estabilidade do SEP.

Ao aplicar perturbações simultâneas em múltiplos nós, foi verificado que o sistema se mantém ainda mais resistente. Essa resiliência é mais pronunciada quando quatro nós são perturbados ao mesmo tempo. Embora o sincronismo da rede tenha sido mantido mesmo em situações de múltiplas perturbações, notou-se que a influência dessas perturbações sobre os osciladores aumenta, fazendo com que os mesmos sigam mais o comportamento da perturbação do que o dos demais nós da rede.

Com base nesses resultados, novas topologias de rede foram testadas para aumentar a resiliência do SEP. A simulação inicial mostrou que a simplificação da rede, por meio da eliminação de conexões redundantes, pode prejudicar a sincronização. Em contrapartida, o aumento da redundância entre os nós demonstrou ser uma estratégia eficaz, garantindo a manutenção do sincronismo mesmo sob perturbações. Esses achados sugerem que a resiliência do SEP pode ser aprimorada ao fortalecer a estrutura de interconexão da rede, destacando a importância de uma arquitetura robusta e redundante.

Além das contribuições teóricas e das simulações, este trabalho desenvolveu placas de circuito impresso (PCBs) para o oscilador de quadratura e o acoplamento entre osciladores, visando facilitar a implementação de circuitos mais eficientes e escaláveis. Esses avanços possibilitam a realização de experimentos práticos para validar os resultados das simulações. Como trabalho futuro, seria relevante construir fisicamente os circuitos desenvolvidos e testar o comportamento do sistema em condições reais, aplicando perturbações controladas. Esses testes práticos ajudariam a refinar o modelo teórico e melhorar a eficiência e a resiliência do SEP frente a perturbações reais.

## REFERÊNCIAS

ACEBRÓN, J. A.; BONILLA, L. L.; VICENTE, C. J. P.; RITORT, F.; SPIGLER, R. The kuramoto model: A review. **Physics Reports**, Elsevier, v. 407, n. 1-4, p. 1–75, 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157304003515>>. Acesso em: 22 mai. 2024.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª. ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2008. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/atlas>>. Acesso em: 22 mai. 2024.

BARRAT, A.; BARTHELEMY, M.; VESPIGNANI, A. **Dynamical Processes on Complex Networks**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/books/dynamical-processes-on-complex-networks/D0173F07E0F05CEE9CF7A6BDAF48E9FC>>. Acesso em: 22 mai. 2024. ISBN 9780521879507.

BIKDASH, M.; HARRIS, A.; THOMPSON, D. Dynamic networks in analog circuit models. **Journal of Applied Physics**, AIP Publishing, v. 128, n. 11, p. 114104, 2020. Disponível em: <<https://link.springer.com/book/9783319969927>>. Acesso em: 22 mai. 2024.

BITTENCOURT, V. H. S.; JUNIOR, W. C. S.; MONTANARI, A. N.; FREITAS, L. Projeto, construção e modelagem não linear do oscilador de quadratura. **SBAI 2023**, Sociedade Brasileira de Automática (SBA), v. 1, n. 1, 2023. Disponível em: <[https://www.sba.org.br/open\\_journal\\_systems/index.php/sbai/article/view/3854](https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbai/article/view/3854)>. Acesso em: 22 mai. 2024.

GRADOWSKI, T.; KRAWIECKI, A. Pair approximation for the q-voter model with independence on multiplex networks. **Physical Review E**, APS, v. 102, n. 2, p. 022314, 2020. Disponível em: <<https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.102.022314>>. Acesso em: 22 mai. 2024.

GRAEME, J. G.; TOBEY, G. E.; HUELSMAN, L. P. Operational amplifiers. design and applications. **New York: McGraw-Hill**, 1971. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1971oads.book.....G/abstract>>. Acesso em: 22 mai. 2024.

KURAMOTO, Y. Self-entrainment of a population of coupled non-linear oscillators. **International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics**, Springer, Berlin, Heidelberg, v. 39, 1975. Disponível em: <<https://link.springer.com/chapter/10.1007/BFb0013365>>. Acesso em: 22 mai. 2024.

MOREIRA, E. I. **Resiliência de redes de Kuramoto: uma aplicação a sistemas elétricos de potência**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/35733>>. Acesso em: 22 mai. 2024.

NEWMAN, M. E. The structure and function of complex networks. **SIAM review**, SIAM, v. 45, n. 2, p. 167–256, 2003. Disponível em: <<https://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/s003614450342480>>. Acesso em: 22 mai. 2024.

NEWMAN, M. E.; GIRVAN, M. Finding and evaluating community structure in networks. **Physical review E**, APS, v. 69, n. 2, p. 026113, 2004. Disponível em:

<<https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.69.026113>>. Acesso em: 22 mai. 2024.

PIKOVSKY, A.; ROSENBLUM, M. Dynamics of globally coupled oscillators: Progress and perspectives. **Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science**, AIP Publishing, v. 25, n. 9, 2015. Disponível em: <<https://pubs.aip.org/aip/cha/article-abstract/25/9/097616/134949/Dynamics-of-globally-coupled-oscillators-Progress?redirectedFrom=fulltext>>. Acesso em: 22 mai. 2024.

PIKOVSKY, A.; ROSENBLUM, M.; KURTHS, J.; SYNCHRONIZATION, A. A universal concept in nonlinear sciences. **Self**, v. 2, p. 3, 2001. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Arkady-Pikovsky/publication/259282918\\_Synchronization/links/55098c8e0cf27e990e0ef041/Synchronization.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Arkady-Pikovsky/publication/259282918_Synchronization/links/55098c8e0cf27e990e0ef041/Synchronization.pdf)>. Acesso em: 22 mai. 2024.

RODRIGUES, F.; SILVA, J.; OLIVEIRA, R. Complex networks for power system analysis: A review. **Energy Reports**, Elsevier, v. 6, p. 376–388, 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9521783>>. Acesso em: 22 mai. 2024.

STROGATZ, S. H. From Kuramoto to Crawford: exploring the onset of synchronization in populations of coupled oscillators. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, Elsevier, v. 143, n. 1-4, p. 1–20, 2000. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167278900000944>>. Acesso em: 22 mai. 2024.

VIANA, S.; SOUSA, J.; LIMA, P. Validation of network models using electronic circuits. **Physical Review E**, v. 104, n. 2, p. 024311, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1007570421000787>>. Acesso em: 22 mai. 2024.

## APÊNDICE A – SIMULAÇÃO SEP BRASILEIRO

```

1 def netExperiment (Rf) :
2
3     # FILENAME (to save data)
4     fileName = "Perturbacao\simul\Rf_%08d"%Rf
5
6     # execute only if the file does not exist
7     if not (os.path.isfile(fileName+".npz")):
8         params = np.array([[10e+03, 15.64e03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220
9 e-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
10 [10e+03, 17.26e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
11 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
12 [10e+03, 14.36e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
13 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
14 [10e+03, 17.16e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
15 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
16 [10e+03, 16.79e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
17 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
18 [10e+03, 14.19e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
19 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
20 [10e+03, 13.90e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
21 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
22 [10e+03, 16.91e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
23 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
24 [10e+03, 17.20e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
25 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
26 [10e+03, 15.90e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
27 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
28 [10e+03, 14.45e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
29 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
30 [10e+03, 15.22e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
31 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
32 [10e+03, 15.16e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
33 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
34 [10e+03, 17.58e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
35 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
36 [10e+03, 15.89e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
37 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
38 [10e+03, 14.03e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
39 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
40 [10e+03, 20.14e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
41 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
42 [10e+03, 14.34e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
43 -09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf]])
44
45     # TRANSIENT SIMULATION
46     x0tr = 0.05*np.random.rand(n*N) #random initial conditions

```

```

29     X001 = qnet.intRK(qnet.quadNetOde, x0tr, tTr, (Adj, params)) #
        simulate systems transient
30     X001 = qnet.intRK(qnet.quadNetOde, X001[-1, :], t, (Adj, params)) #
        simulate permanent regime
31
32     # Compute the order parameter
33     pc001 = qnet.orderParameter(X001, n=3, hilbert=True)
34     pcMean = np.mean(pc001)
35     pcStd = np.std(pc001)
36
37     # SAVE DATA compressed
38     print("saving file: "+fileName)
39     np.savez_compressed(fileName+".npz", Rf=Rf, pcMean=pcMean, pcStd=
pcStd)
40     else:
41         #the file exists, do not execute simulation
42         pcMean = 0
43
44     return pcMean
45
46 # PARAMETERS of the NETWORK
47 # adjacency matrix (two mutually coupled oscillator)
48     # 1,2,3,4,5,6,7,8,9,0,1,2,3,4,5,6,7,8
49 Adj = np.array([[0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], #1
50                [1,0,1,1,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0], #2
51                [0,1,0,1,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0], #3
52                [0,1,1,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0], #4
53                [0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], #5
54                [0,1,1,1,0,0,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0], #6
55                [0,1,1,1,1,1,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0], #7
56                [0,1,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,1,1,0,1,0], #8
57                [0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0], #9
58                [0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,1,1,1,1,0,1,0], #10
59                [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0], #11
60                [0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0], #12
61                [0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,1,1,0,1,0], #13
62                [0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0], #14
63                [0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1], #15
64                [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,1], #16
65                [0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,0], #17
66                [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0]]) #18
67
68 Adj = Adj.T
69
70 N = len(Adj) #number of oscillators
71 Ra, Rb, R, Rf = 100e+3, 100e+3, 100e+3, 100e+3
72 Rfvec = np.arange(83.92e+03, 83.94e+03, 1)

```

```
73 params = np.empty((N, 16))
74 Rfvec_len = len(Rfvec)
75 print("Simulating %d experiments..."%Rfvec_len)
76
77 # PARAMETERS of the SIMULATION
78 h = .00005 #integration step (h=0.001)
79 tfTr = 0.6 #transient time
80 tf = 1.2 #final time
81 n = 3 #system order
82 tTr = np.arange(0, tfTr, h) #transient time vector
83 t = np.arange(0, tf, h) #time vector
84 N001 = len(t) #length of time vector
85
86 # PARALLEL PROCESSING
87 num_cores = multiprocessing.cpu_count()
88 pcMean = joblib.Parallel(n_jobs=num_cores, verbose=50)(
89     joblib.delayed(netExperiment)(k) for k in Rfvec)
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

## APÊNDICE B – TESTES DE RESILIÊNCIA NO SEP BRASILEIRO

```

1 def netPert (R2) :
2
3     # FILENAME (to save data)
4     fileName = "Perturbacao\SEP\sim18\R2_%08d"%R2
5
6     # adjacency matrix (two mutually coupled oscillator)
7     #           1  2  3  4  5  6
8     # 1,2,3,4,5,6,7,8,9,0,1,2,3,4,5,6,7,8
9     Adj = np.array([[0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], #1
10                    [1,0,1,1,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0], #2
11                    [0,1,0,1,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0], #3
12                    [0,1,1,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0], #4
13                    [0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0], #5
14                    [0,1,1,1,0,0,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0], #6
15                    [0,1,1,1,1,1,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0], #7
16                    [0,1,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,1,1,0,1,0,0], #8
17                    [0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0,0], #9
18                    [0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,1,1,1,1,0,1,0,0], #10
19                    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0], #11
20                    [0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,0], #12
21                    [0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,1,1,0,1,0,0], #13
22                    [0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0], #14
23                    [0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0], #15
24                    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,1,0], #16
25                    [0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,0,0], #17
26                    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0], #18
27                    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,100,0]]) #Pertubacao
28
29     Adj = Adj.T
30
31     N = len(Adj) #number of oscillators
32     Ra, Rb, R, Rf = 100e+3, 100e+3, 100e+3, 83938
33
34     params = np.empty((N, 16))
35     # PARAMETERS of the SIMULATION
36     h = .00005 #integration step (h=0.001)
37     tfTr = 0.6 #transient time
38     tf = 1.2 #final time
39     n = 3 #system order
40     tTr = np.arange(0, tfTr, h) #transient time vector
41     t = np.arange(0, tf, h) #time vector
42     N001 = len(t) #length of time vector
43
44     # execute only if the file does not exist
45     if not (os.path.isfile(fileName+".npz")):
46         params = np.array([[10e+03, 15.64e03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220

```

```

e-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
47 [10e+03, 17.26e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
48 [10e+03, 14.36e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
49 [10e+03, 17.16e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
50 [10e+03, 16.79e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
51 [10e+03, 14.19e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
52 [10e+03, 13.90e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
53 [10e+03, 16.91e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
54 [10e+03, 17.20e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
55 [10e+03, 15.90e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
56 [10e+03, 14.45e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
57 [10e+03, 15.22e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
58 [10e+03, 15.16e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
59 [10e+03, 17.58e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
60 [10e+03, 15.89e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
61 [10e+03, 14.03e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
62 [10e+03, 20.14e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
63 [10e+03, 14.34e+03, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e
-09, 22e+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf],
64 [10e+03, R2, 220e-09, 220e-09, 12e+03, 220e-09, 22e
+03, 4.7e+03, 4.7e+03, 22e+03, 15, 0.7, Ra, Rb, R, Rf]])
65
66 # TRANSIENT SIMULATION
67 x0tr = 0.05*np.random.rand(n*N) #random initial conditions
68 X001 = qnet.intrRK(qnet.quadNetOde, x0tr, tTr, (Adj, params)) #
simulate systems transient
69 X001 = qnet.intrRK(qnet.quadNetOde, X001[-1, :], t, (Adj, params)) #
simulate permanent regime
70
71 # Compute the order parameter
72 pc001 = qnet.orderParameter(X001[:, :54], n=3, hilbert=True)

```

```
73     pcMean = np.mean(pc001)
74     pcStd = np.std(pc001)
75
76     # SAVE DATA compressed
77     print("saving file: "+fileName)
78     np.savez_compressed(fileName+".npz", R2=R2, pcMean=pcMean, pcStd=
pcStd)
79     else:
80         #the file exists, do not execute simulation
81         pcMean = 0
82
83     return pcMean
84
85     R2vec = np.arange(12e+03, 15e+03, 50)
86
87 R2vec_len = len(R2vec)
88 print("Simulating %d experiments..."%R2vec_len)
89
90 # PARALLEL PROCESSING
91 num_cores = multiprocessing.cpu_count()
92 pcMean = joblib.Parallel(n_jobs=num_cores, verbose=50)(
93     joblib.delayed(netPert)(k) for k in R2vec)
```

Fonte: Elaborado pelo autor.