

Uma Introdução aos Sistemas Dinâmicos Discretos

Agenor Gonçalves Neto

São Paulo, 2020

Sumário

1	Conceitos Iniciais	1
2	Função Logística	2
2.1	Conjuntos de Cantor	3
2.2	Caos	5
2.3	Conjugação Topológica	6
2.4	Dinâmica Simbólica	8
3	Teorema de Sharkovsky	9
4	Derivada de Schwarz	12
5	Bifurcação	14
6	Subshift	18
7	Teoria Kneading	23

1 Conceitos Iniciais

Definição 1.1. Sejam $f : X \rightarrow X$ uma função e $p \in X$. Se $f^n(p) = p$ para algum $n \geq 1$, dizemos que p é um ponto periódico de período n .

Definição 1.2. Sejam $f : X \rightarrow X$ uma função e $x \in X$. Dizemos que $\mathcal{O}(x) = \{x, f(x), f^2(x), \dots\}$ é a órbita de x .

Definição 1.3. Sejam $f : X \rightarrow X$ uma função e p um ponto periódico de período n . Dizemos que $\mathcal{B}(p) = \{x \in X : \lim_{k \rightarrow \infty} f^{kn}(x) = p\}$ é a bacia de atração de p e que $\mathcal{B}(\infty) = \{x \in X : \lim_{k \rightarrow \infty} |f^k(x)| = \infty\}$ é a bacia de atração de ∞ .

Proposição 1.4. *Seja $f : X \rightarrow X$ uma função. Se p e q são pontos periódicos distintos, então $\mathcal{B}(p) \cap \mathcal{B}(q) = \emptyset$.*

Demonstração. Sejam m e n os períodos de p e q , respectivamente. Se existe $x \in \mathcal{B}(p) \cap \mathcal{B}(q)$, então

$$p = \lim_{k \rightarrow \infty} f^{(kn)m}(x) = \lim_{k \rightarrow \infty} f^{(km)n}(x) = q.$$

□

Proposição 1.5. *Seja $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ uma função contínua. Se $f([a, b]) \subset [a, b]$ ou $f([a, b]) \supset [a, b]$, então f possui ponto fixo.*

Demonstração. Suponha que $f([a, b]) \subset [a, b]$. Considere a função $g(x) = f(x) - x$ definida em $[a, b]$. Observando que $g(a) \geq 0$ e $g(b) \leq 0$ e utilizando o TVI, existe $p \in [a, b]$ tal que $g(p) = 0$.

Suponha que $f([a, b]) \supset [a, b]$ e sejam $c, d \in [a, b]$ tais que $f(c) = a$ e $f(d) = b$. Considere a função $g(x) = f(x) - x$ definida em $[a, b]$. Observando que $g(c) \leq 0$ e $g(d) \geq 0$ e utilizando o TVI, existe $p \in [a, b]$ tal que $g(p) = 0$. □

Definição 1.6. Sejam $f : [a, b] \rightarrow [a, b]$ uma função derivável e p um ponto periódico de período principal n . Dizemos que p é um ponto hiperbólico se $|\partial f^n(p)| \neq 1$. Dizemos que p é um ponto atrator se $|\partial f^n(p)| < 1$ e que p é um ponto repulsor se $|\partial f^n(p)| > 1$.

Teorema 1.7. *Sejam $f : [a, b] \rightarrow [a, b]$ uma função de classe \mathcal{C}^1 e p um ponto periódico de período principal n .*

1. *Se p é um ponto atrator, então existe uma vizinhança de p contida em $\mathcal{B}(p)$.*
2. *Se p é um ponto repulsor, então existe uma vizinhança de p com a seguinte propriedade: se x pertence à essa vizinhança e $x \neq p$, então $f^{kn}(x) \notin V$ para algum $k \geq 1$.*

Demonstração. 1. Sendo ∂f é contínua, existe $\varepsilon > 0$ tal que $|\partial f^n(x)| \leq \lambda < 1$ para todo $x \in (p - \varepsilon, p + \varepsilon)$. Pelo TVM, se $x \in (p - \varepsilon, p + \varepsilon)$, então $|f^n(x) - p| \leq \lambda|x - p|$. Por indução, $|f^{kn}(x) - p| \leq \lambda^k|x - p|$ para todo $k \geq 1$. Desse modo, $\lim_{k \rightarrow \infty} f^{kn}(x) = p$.

2. Demonstração análoga.

□

2 Função Logística

Proposição 2.1. *Se $\mu > 1$, então*

1. $F(1) = F(0) = 0$.
2. $F\left(\frac{1}{\mu}\right) = F(p_\mu) = p_\mu$, onde $p_\mu = \frac{\mu-1}{\mu}$.
3. $0 < p_\mu < 1$.

Proposição 2.2. *Se $\mu > 1$, então $(-\infty, 0) \cup (1, \infty) \subset \mathcal{B}(\infty)$.*

Demonstração. Inicialmente, se $x \in (1, \infty)$, então $F(x) \in (-\infty, 0)$. Por fim, observamos que a sequência $(x, F(x), F^2(x), \dots)$ é estritamente decrescente e ilimitada quando $x \in (-\infty, 0)$. □

Proposição 2.3. *Se $1 < \mu < 3$, então*

1. *0 é um ponto repulsor e p_μ é um ponto atrator.*
2. $(0, 1) \subset \mathcal{B}(p_\mu)$.

Demonstração. 1. $|\partial F(0)| = \mu > 1$ e $|\partial F(p_\mu)| = |2 - \mu| < 1$.

2. Exercício.

□

Desse modo, a dinâmica de F quando $1 < \mu < 3$ é dada por $\mathcal{B}(0) = \{0, 1\}$, $\mathcal{B}(p_\mu) = (0, 1)$ e $\mathcal{B}(\infty) = (-\infty, 0) \cup (1, \infty)$.

2.1 Conjuntos de Cantor

Se $\mu > 4$, então $F(\frac{1}{2}) = \frac{\mu}{4} > 1$, ou seja, existem pontos em $[0, 1]$ que não permanecem em $[0, 1]$ após uma iteração de F . Em vista da Proposição 2.2, tais pontos pertencem ao conjunto $\mathcal{B}(\infty)$. De modo mais geral, se um ponto de $[0, 1]$ não permanece em $[0, 1]$ após um número finito de iterações, então ele pertence ao conjunto $\mathcal{B}(\infty)$.

Desse modo, considere o conjunto $\Lambda_n = \{x \in [0, 1] : F^n(x) \in [0, 1]\}$ formado pelos pontos que permanecem em $[0, 1]$ após n iterações de F e considere o conjunto $\Lambda = \cap_{n=0}^{\infty} \Lambda_n = \{x \in [0, 1] : F^n(x) \in [0, 1] \text{ para todo } n \geq 1\}$, que é formado pelos pontos de $[0, 1]$ que sempre permanecem em $[0, 1]$ por iterações de F . Observe que $\Lambda_n \supset \Lambda_{n+1}$, para todo $n \geq 1$, pois se $F^{n+1}(x) = F(F^n(x)) \in [0, 1]$, então $F^n(x) \in [0, 1]$.

Proposição 2.4. *Se $\mu > 4$, então*

1. $\Lambda_1 = [0, x_1] \cup [x_2, 1]$, onde $x_1 = \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{\mu^2 - 4\mu}}{2\mu}$ e $x_2 = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{\mu^2 - 4\mu}}{2\mu}$.
2. Λ_n é a união de 2^n intervalos fechados disjuntos.
3. $F^n : [a, b] \rightarrow [0, 1]$ é bijetora, onde $[a, b]$ é um dos intervalos que formam Λ_n .

Demonstração. Analisando F' observamos que F é estritamente crescente no intervalo $[0, \frac{1}{2}]$ e estritamente decrescente no intervalo $[\frac{1}{2}, 1]$. Como $F(0) = F(1) = 0$ e $F(\frac{1}{2}) > 1$, o Teorema do Valor Intermediário garante que existem $x_1 \in (0, \frac{1}{2})$ e $x_2 \in (\frac{1}{2}, 1)$ tais que $F(x_1) = F(x_2) = 1$. Os valores de x_1 e x_2 são encontrados resolvendo a equação de segundo grau $\mu x(1-x) = 1$. Logo, $F([0, x_1]) = F([x_2, 1]) = [0, 1]$ e $F(x) > 1$ para todo $x \in (x_1, x_2)$. Portanto, $\Lambda_1 = [0, x_1] \cup [x_2, 1]$ e o item 1 está demonstrado.

A demonstração dos itens 2 e 3 será feita por indução. De acordo com a primeira parte, Λ_1 é a união de $2^1 = 2$ intervalos fechados disjuntos e F restrita a cada um desses intervalos é uma bijeção com o intervalo $[0, 1]$.

Suponha que Λ_{k-1} é a união de 2^{k-1} intervalos fechados disjuntos de modo que $F^{k-1} : [a, b] \rightarrow [0, 1]$ é bijetora para todo intervalo $[a, b]$ que forma Λ_{k-1} . Sendo F^{k-1} bijetora, $(F^{k-1})'(x) > 0$ ou $(F^{k-1})'(x) < 0$ para todo $x \in [a, b]$. Como as demonstrações para os dois casos são análogas, podemos supor que $(F^{k-1})'(x) > 0$.

Como F^{k-1} é estritamente crescente, o Teorema do Valor Intermediário afirma que existem únicos $\overline{x_1}, \overline{x_2} \in (a, b)$ tais que

(a) $a < \overline{x_1} < \overline{x_2} < b$,

(b) $F^{k-1}([a, \overline{x_1}]) = [0, x_1]$,

$$(c) \ F^{k-1}((\overline{x_1}, \overline{x_2})) = (x_1, x_2) \text{ e}$$

$$(d) \ F^{k-1}([\overline{x_2}, 1]) = [x_2, 1].$$

As condições acima garantem que os intervalos $[a, \overline{x_1}]$, $[\overline{x_2}, b]$ são disjuntos e que $F^k(x) = F(F^{k-1}(x)) > 1$ para todo $x \in (\overline{x_1}, \overline{x_2})$. Também, temos que $F^k([a, \overline{x_1}]) = F([0, x_1]) = [0, 1]$ e, analogamente, $F^k([\overline{x_2}, 1]) = [0, 1]$. Além disso,

$$(F^k)'([a, \overline{x_1}]) = F'(F^{k-1}([a, \overline{x_1}]))(F^{k-1})'([a, \overline{x_1}]) = F'([0, x_1])(F^{k-1})'([a, \overline{x_1}]) > 0$$

e, analogamente,

$$(F^k)'([\overline{x_2}, 1]) = F'([x_2, 1])(F^{k-1})'([\overline{x_2}, 1]) < 0.$$

Logo, F^k é uma bijeção entre $[a, \overline{x_1}]$ e $[0, 1]$ e entre $[\overline{x_2}, 1]$ e $[0, 1]$.

Portanto, a partir de cada intervalo fechado de Λ_{k-1} , construímos dois novos intervalos fechados disjuntos tais que F^k restrita em cada um desses intervalos é um bijeção com $[0, 1]$ e, dessa maneira, esses intervalos estão contidos em Λ_k . Desse modo, se Λ_{k-1} é formado por 2^{k-1} intervalos fechados disjuntos, então Λ_k é formado por $2 \times 2^{k-1} = 2^k$ intervalos fechados disjuntos. Assim, o resultado está provado. \square

Definição 2.5. Seja $\Gamma \subset \mathbb{R}$ um conjunto não vazio. Dizemos que Γ é um conjunto de Cantor se as seguintes condições são válidas:

- i. Γ é compacto.
- ii. Γ não possui intervalos.
- iii. Todo ponto de Γ é um ponto de acumulação de Γ .

Lema 2.6. Se $\mu > 2 + \sqrt{5}$, então

- 1. existe $\lambda > 1$ tal que $|\partial F(x)| > \lambda$ para todo $x \in \Lambda_1$.
- 2. $b - a < \frac{1}{\lambda^n}$, onde $[a, b]$ é um dos intervalos que formam Λ_n .
- 3. dados $x \in \Lambda$ e $\varepsilon > 0$, existe um intervalo $[a, b] \subset \Lambda_n$ para algum $n \geq 1$ tal que $x \in [a, b]$, $b - a < \varepsilon$ e $F^n : [a, b] \rightarrow [0, 1]$ é bijetora.

Demonstração. 1. Inicialmente, observamos que $\mu^2 - 4\mu > 1$ quando $\mu > 2 + \sqrt{5}$. Desse modo, $F'(x_1) = \sqrt{\mu^2 - 4\mu} > 1$ e $F'(x_2) = -\sqrt{\mu^2 - 4\mu} < -1$, onde x_1 e x_2 são como na Proposição 2.4. Observamos também que F' é estritamente decrescente, pois $F''(x) = -2\mu < 0$. Portanto, $F'(x) \geq F'(x_1) > 1$ para todo $x \in [0, x_1]$ e $F'(x) \leq F'(x_2) < -1$ para todo $x \in [x_2, 1]$. De acordo com a Proposição 2.4, $\Lambda_1 = [0, x_1] \cup [x_2, 1]$ e, desse modo, $|F'(x)| > 1$ para todo $x \in \Lambda_1$. Sendo F' contínua e Λ_1 compacto, existe $\lambda > 1$ tal que $|F'(x)| > \lambda$ para todo $x \in \Lambda_1$.

- 2. De acordo com a Proposição 2.4, Λ_n é formado pela união de 2^n intervalos disjuntos. Seja $[a, b]$ um desses intervalos. Se $x \in [a, b]$, em particular $F^k(x) \in \Lambda_1$ para todo $0 \leq k < n$. Desse modo, de acordo com o item anterior, temos que $(F^n)'(x) = F'(F^{n-1}(x)) \times F'(F^{n-2}(x)) \times \dots \times F'(x) > \lambda^n$.

Pelo Teorema do Valor Médio, existe $c \in [a, b]$ tal que

$$|F^n(b) - F^n(a)| = |(F^n)'(c)| |b - a| > \lambda^n |b - a|$$

Como $F^n : [a, b] \rightarrow [0, 1]$ é contínua e bijetora, temos que $|F^n(b) - F^n(a)| = 1$. Desse modo, $|b - a| < \frac{1}{\lambda^n}$ e a afirmação está provada.

3. Sejam $x \in \Lambda$, $\varepsilon > 0$ e $n \geq 1$ tal que $\frac{1}{\lambda^n} < \varepsilon$, onde $\lambda > 1$ é como no primeiro item. Em particular, $x \in \Lambda_n$. Seja I um dos intervalos que formam Λ_n e que contém x . Pelo item anterior, o tamanho de I é menor que ε . Além disso, pela Proposição 2.4, $F^n : I \rightarrow [0, 1]$ é bijetora e, portanto, a afirmação está provada. \square

Teorema 2.7. *Se $\mu > 2 + \sqrt{5}$, então Λ é um conjunto de Cantor.*

Demonstração. Λ é não vazio pois $0 \in \Lambda$, é limitado pois $\Lambda_1 \subset [0, 1]$ e é fechado pois é intersecção de conjuntos fechados.

Agora, suponha que Λ contém algum intervalo. Então, existem $x, y \in I$, $x < y$, tais que $[x, y] \subset \Lambda$. Seja k tal que $\frac{1}{\lambda^k} < |x - y|$. Em particular, $[x, y] \subset \Lambda_k$. Mas, de acordo com o Lema 2.6, os intervalos de Λ_k possuem tamanho menor que $\frac{1}{\lambda^k}$. Absurdo e, portanto, Λ não possui intervalos.

Por fim, observe que, se x é um ponto extremo de algum intervalo de Λ_n , então $x \in \Lambda$ pois $F^{n+1}(x) = 0$. Sejam $x \in \Lambda$, $\varepsilon > 0$ e $k \geq 1$ tal que $\frac{1}{\lambda^k} < \varepsilon$. Em particular, $x \in \Lambda_k$ e, portanto, x é elemento de algum intervalo cujo tamanho é menor que ε , de acordo com o Lema 2.6. Portanto, existe $y \in \Lambda$ ponto extremo do intervalo que contém x tal que $|x - y| < \varepsilon$. Como ε é arbitrário, concluímos que x é um ponto de acumulação de Λ . \square

2.2 Caos

Proposição 2.8. *Se $\mu > 2 + \sqrt{5}$, então o conjunto de pontos periódicos de $F : \Lambda \rightarrow \Lambda$ é denso em Λ .*

Demonstração. Sejam $x \in \Lambda$, $\varepsilon > 0$ e $k \geq 1$ tal que $\frac{1}{\lambda^k} < \varepsilon$. De acordo com o Lema 2.6, o intervalo fechado $I \subset \Lambda_k$ que contém x possui tamanho menor que ε . Pela Proposição 2.4, $F^k : I \rightarrow [0, 1]$ é bijetora. Como $F^k(I) \supset I$, a Proposição ?? afirma que existe $y \in I$ tal que $F^k(y) = y$. Observando que $y \in \Lambda$ e $|x - y| < \varepsilon$, o resultado está provado. \square

Definição 2.9. Seja $f : X \rightarrow X$ uma função. Dizemos que f é transitiva topologicamente se dados $x, y \in X$ e $\varepsilon > 0$, existem $z \in X$ e $j \geq 1$ tais que $|z - x| < \varepsilon$ e $|f^j(z) - y| < \varepsilon$.

Proposição 2.10. *Se $\mu > 2 + \sqrt{5}$, então $F : \Lambda \rightarrow \Lambda$ é transitiva topologicamente.*

Demonstração. Sejam $x, y \in \Lambda$ e $\varepsilon > 0$. Existe $k \geq 1$ tal que $\frac{1}{\lambda^k} < \varepsilon$. De acordo com o Lema 2.6, o tamanho de cada intervalo fechado em Λ_k é menor que $\frac{1}{\lambda^k}$ e, portanto, menor que ε . Como $x \in \Lambda_k$, existe um intervalo $[a, b] \subset \Lambda_k$ que contém x . Pela Proposição 2.4, $F^k : [a, b] \rightarrow [0, 1]$ é bijetora e, pelo Teorema do Valor Intermediário, existe $z \in [a, b]$ tal que $F^k(z) = y$. Observando que $z \in \Lambda$, concluímos que F é transitiva topologicamente. \square

Definição 2.11. Seja $f : X \rightarrow X$ uma função. Dizemos que f depende sensivelmente das condições iniciais se existe $\delta > 0$ com a seguinte propriedade: dados $x \in X$ e $\varepsilon > 0$, existem $y \in X$ e $j \geq 1$ tais que $|x - y| < \varepsilon$ e $|f^j(x) - f^j(y)| > \delta$.

Proposição 2.12. Se $\mu > 2 + \sqrt{5}$, então $F : \Lambda \rightarrow \Lambda$ depende sensivelmente das condições iniciais.

Demonstração. Sejam $x \in \Lambda$, $\varepsilon > 0$ e $k \geq 1$ tal que $\frac{1}{\lambda^k} < \varepsilon$. Como na demonstração da Proposição anterior, seja I o intervalo fechado contido em Λ_k que contém x e cujo tamanho é menor que ε . Como $F^k : I \rightarrow [0, 1]$ é um bijeção, então $F^k(a) = 0$ e $F^k(b) = 1$, onde a e b são pontos extremos de I . Como $F(\frac{1}{2}) > 1$ e $x \in \Lambda$, segue que $F^k(x) \in [0, \frac{1}{2}) \cup (\frac{1}{2}, 1]$. Se $F^k(x) \in [0, \frac{1}{2})$, então $|F^k(x) - F^k(b)| = |F^k(x) - 1| > \frac{1}{2}$ e se $F^k(x) \in (\frac{1}{2}, 1]$, então $|F^k(x) - F^k(a)| = |F^k(x)| > \frac{1}{2}$. Observando que $|x - a| < \varepsilon$ e $|x - b| < \varepsilon$, temos o resultado para $\delta = \frac{1}{2}$. \square

Definição 2.13. Seja $f : X \rightarrow X$ uma função. Dizemos que f é caótica se as seguintes condições são válidas:

- i. O conjunto de pontos periódicos de f é denso em X .
- ii. f é transitiva topologicamente.
- iii. f depende sensivelmente das condições iniciais.

Teorema 2.14. Se $\mu > 2 + \sqrt{5}$, então $F : \Lambda \rightarrow \Lambda$ é caótica.

Teorema 2.15. Seja $X \subset \mathbb{R}$ um conjunto infinito e $f : X \rightarrow X$ é uma função. Se o conjunto de pontos periódicos de f é denso em X e f é transitiva topologicamente, então f é caótica.

2.3 Conjugação Topológica

Definição 2.16. Sejam $f : X \rightarrow X$, $g : Y \rightarrow Y$ e $\tau : X \rightarrow Y$ funções. Dizemos que f e g são conjugadas topologicamente por τ se τ se as seguintes condições são válidas:

- i. τ é um homeomorfismo.
- ii. $\tau \circ f = g \circ \tau$.

Proposição 2.17. Sejam $f : X \rightarrow X$, $g : Y \rightarrow Y$ e $\tau : X \rightarrow Y$ funções. Se f e g são conjugadas topologicamente por τ , então

1. g e f são conjugadas topologicamente por τ^{-1} .
2. $\tau \circ f^j = g^j \circ \tau$ para todo $j \geq 1$.
3. p é ponto periódico de f se e somente se $\tau(p)$ é ponto periódico de g .
4. $\mathcal{B}(\tau(p)) = \tau(\mathcal{B}(p))$, onde p é um ponto periódico de f .
5. o conjunto de pontos periódicos de f é denso em X se e somente se o conjunto de pontos periódicos de g é denso em Y .

6. f é transitiva topologicamente se e somente se g é transitiva topologicamente.

Demonstração. 1. Como τ é um homeomorfismo, a função inversa τ^{-1} existe e também é um homeomorfismo. Além disso, $\tau \circ f = g \circ \tau$ implica que $f \circ \tau^{-1} = \tau^{-1} \circ g$. Portanto, τ^{-1} é conjugação topológica de g e f .

2. Por definição, a afirmação é verdadeira quando $n = 1$. Suponha que $\tau \circ f^{n-1} = g^{n-1} \circ \tau$. Desse modo, $\tau \circ f^n = \tau \circ f^{n-1} \circ f = g^{n-1} \circ \tau \circ f = g^{n-1} \circ g \circ \tau = g^n \circ \tau$. Portanto, a afirmação é verdadeira para todo $n \geq 1$.

3. Suponha que p é um ponto periódico de f com período principal n . Desse modo, $g^n(\tau(p)) = \tau(f^n(p)) = \tau(p)$. Se $k = 1, \dots, n-1$, então $g^k(\tau(p)) = \tau(f^k(p)) \neq \tau(p)$, pois $f^k(p) \neq p$ e τ é injetora. Portanto, $\tau(p)$ é um ponto periódico de g com período principal n . A outra implicação é demonstrada de maneira análoga.

4. Suponha que p é um ponto periódico com período n . Se $x \in W^s(\tau(p))$, então $\lim_{k \rightarrow \infty} g^{kn}(x) = \tau(p)$. Como τ^{-1} é contínua, temos $\lim_{k \rightarrow \infty} f^{kn}(\tau^{-1}(x)) = \lim_{k \rightarrow \infty} \tau^{-1}(g^{kn}(x)) = p$. Então, $x \in \tau(W^s(p))$ pois $\tau^{-1}(x) \in W^s(p)$.

Por outro lado, se $\tau(x) \in \tau(W^s(p))$, então $\lim_{k \rightarrow \infty} f^{kn}(x) = p$. Como τ é contínua, temos $\lim_{k \rightarrow \infty} g^{kn}(\tau(x)) = \lim_{k \rightarrow \infty} \tau(f^{kn}(x)) = \tau(p)$ e, portanto, $\tau(x) \in W^s(\tau(p))$.

5. Se o conjunto $Per(f)$ dos pontos periódicos de f é denso em A , então $\tau(Per(f))$ é denso em B pois τ é um homeomorfismo. Como $\tau(Per(f)) = Per(g)$, temos que $Per(g)$ é denso em B . A outra implicação é demonstrada de maneira análoga.

6. Inicialmente, sendo τ é contínua, dado $\varepsilon > 0$ existe $\delta > 0$ de modo que, se $z \in A$, $|x - z| < \delta$ e $|y - f^n(z)| < \delta$, então $|\tau(x) - \tau(z)| < \varepsilon$ e $|\tau(y) - \tau(f^n(z))| < \varepsilon$, onde $n \geq 1$ é fixado.

Se $x', y' \in B$, existem $x, y \in A$ tais que $\tau(x) = x'$ e $\tau(y) = y'$. Como f é transitiva topologicamente, existe $z \in A$ tal que $|x - z| < \delta$ e $|y - f^n(z)| < \delta$ para algum $n \geq 1$. Portanto, $|\tau(x) - \tau(z)| < \varepsilon$ e $|\tau(y) - \tau(f^n(z))| < \varepsilon$. Se $\tau(z) = z'$, então $|x' - z'| < \varepsilon$ e $|y' - g^n(z')| < \varepsilon$ e, portanto, g é transitiva topologicamente. A outra implicação é demonstrada de maneira análoga.

□

Lema 2.18. A função $T : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, dada por

$$T(x) = \begin{cases} 2x & x \in [0, \frac{1}{2}] \\ 2 - 2x & x \in [\frac{1}{2}, 1] \end{cases},$$

é caótica.

Demonstração. Inicialmente, provaremos por indução que $T^n : [\frac{k}{2^n}, \frac{k+1}{2^n}] \rightarrow [0, 1]$ é uma função linear bijetora para todo $0 \leq k < 2^n$. Pela definição de T , a afirmação é verdadeira quando $n = 1$. Suponha que $T^{n-1} : [\frac{k}{2^{n-1}}, \frac{k+1}{2^{n-1}}] \rightarrow [0, 1]$ é uma função linear bijetora para todo $0 \leq k < 2^{n-1}$. Fixado k , podemos supor que $T^{n-1}(\frac{k}{2^{n-1}}) = 0$ e $T^{n-1}(\frac{k+1}{2^{n-1}}) = 1$. O caso em que $T^{n-1}(\frac{k}{2^{n-1}}) = 1$ e $T^{n-1}(\frac{k+1}{2^{n-1}}) = 0$ é tratado de maneira análoga. Temos que $T^{n-1}(\bar{x}) = \frac{1}{2}$,

onde $\bar{x} = \frac{2k+1}{2^n}$ é o ponto médio do intervalo $[\frac{k}{2^{n-1}}, \frac{k+1}{2^{n-1}}]$. Portanto, $T^n(\bar{x}) = T(T^{n-1}(\bar{x})) = T(\frac{1}{2}) = 1$, $T^n(\frac{k}{2^{n-1}}) = T(0) = 0$ e $T^n(\frac{k+1}{2^{n-1}}) = T(1) = 0$. Desse modo, $T^n : [\frac{k}{2^{n-1}}, \bar{x}] \rightarrow [0, 1]$ e $T^n : [\bar{x}, \frac{k+1}{2^{n-1}}] \rightarrow [0, 1]$ são funções lineares (pois são composições de funções lineares) e bijetoras para todo $0 \leq k < 2^{n-1}$. Observando que $[\frac{k}{2^{n-1}}, \bar{x}] = [\frac{2k}{2^n}, \frac{2k+1}{2^n}]$ e $[\bar{x}, \frac{k+1}{2^{n-1}}] = [\frac{2k+1}{2^n}, \frac{2k+2}{2^n}]$, concluímos que $T^n : [\frac{k}{2^n}, \frac{k+1}{2^n}] \rightarrow [0, 1]$ é uma função linear bijetora para todo $0 \leq k < 2^n$ e, portanto, a afirmação está provada.

Para provar que T é caótica, seja $\varepsilon > 0$. Pelo afirmação do parágrafo anterior, existem $n \geq 1$ e $I = [\frac{k}{2^n}, \frac{k+1}{2^n}]$ tais que $\frac{1}{2^n} < \varepsilon$, $x \in I$ e $T^n : I \rightarrow [0, 1]$ é bijetora.

Seja $x \in [0, 1]$. Como $T(I) \supset I$, a Proposição ?? afirma que existe $p \in I$ tal que $T^n(p) = p$. Observando que $|x - p| \leq \frac{1}{2^n} < \varepsilon$, concluímos que o conjunto de pontos periódicos de T é denso em $[0, 1]$.

Sejam $x, y \in [0, 1]$. Como $T^n : I \rightarrow [0, 1]$ é sobrejetora, existe $z \in I$ tal que $T^n(z) = y$. Observando que $|z - x| \leq \frac{1}{2^n} < \varepsilon$ e $|T^n(z) - y| = 0 < \varepsilon$, concluímos que T é transitiva topologicamente.

Seja $x \in [0, 1]$. Como $T^n : I \rightarrow [0, 1]$ é sobrejetora, existem $a, b \in I$ tais que $T^n(a) = 0$ e $T^n(b) = 1$. Se $T^n(x) \in [0, \frac{1}{2}]$, então $|T^n(x) - T^n(b)| = |T^n(x) - 1| \geq \frac{1}{2}$ e se $T^n(x) \in [\frac{1}{2}, 1]$, então $|T^n(x) - T^n(a)| = |T^n(x)| \geq \frac{1}{2}$. Observando que $|x - a| \leq \frac{1}{2^n} < \varepsilon$ e $|x - b| \leq \frac{1}{2^n} < \varepsilon$, concluímos que T depende sensivelmente das condições iniciais. \square

Teorema 2.19. *Se $\mu = 4$, então F é caótica.*

Demonstração. Basta observar que $F \circ \tau = \tau \circ T$, onde $\tau : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ é o homeomorfismo dado por $\tau(x) = \sin^2(\frac{\pi x}{2})$. \square

2.4 Dinâmica Simbólica

Definição 2.20. $\Sigma_2 = \{(s_0 s_1 s_2 \dots) : s_j \in \{0, 1\} \text{ para todo } j \geq 0\}$ é o espaço das sequências de 0 e 1.

Proposição 2.21. *A função $d : \Sigma_2 \times \Sigma_2 \rightarrow \mathbb{R}$, dada por*

$$d(s, t) = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{|s_j - t_j|}{2^j},$$

é uma distância em Σ_2 .

Proposição 2.22. *Sejam $s = (s_0 s_1 s_2 \dots)$ e $t = (t_0 t_1 t_2 \dots)$ elementos de Σ_2 .*

1. *Se $s_j = t_j$ para todo $0 \leq j \leq n$, então $d(s, t) \leq \frac{1}{2^n}$.*
2. *Se $d(s, t) < \frac{1}{2^n}$, então $s_j = t_j$ para todo $0 \leq j \leq n$.*

Demonstração. Suponha que $s_k = t_k$ para todo $0 \leq k \leq n$. Desse modo,

$$d(s, t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{|s_k - t_k|}{2^k} = \sum_{k=n+1}^{\infty} \frac{|s_k - t_k|}{2^k} \leq \sum_{k=n+1}^{\infty} \frac{1}{2^k} = \frac{1}{2^n}$$

Por outro lado, se $s_i \neq t_i$ para algum $0 \leq i \leq n$, então

$$d(s, t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{|s_k - t_k|}{2^k} \geq \frac{1}{2^i} \geq \frac{1}{2^n}$$

Portanto, se $s_k = t_k$ para todo $0 \leq k \leq n$, concluímos que $d(s, t) < \frac{1}{2^n}$. \square

Definição 2.23. A função $\sigma : \Sigma_2 \rightarrow \Sigma_2$, dada por $\sigma(s_0 s_1 s_2 \dots) = (s_1 s_2 s_3 \dots)$, é chamada de *função shift*.

Proposição 2.24. σ é contínua.

Demonstração. Sejam $s = (s_0 s_1 s_2 \dots) \in \Sigma_2$, $\varepsilon > 0$ e $n \geq 1$ tal que $\frac{1}{2^n} < \varepsilon$. Se $t = (t_0 t_1 t_2 \dots) \in \Sigma_2$ e $d(s, t) < \frac{1}{2^{n+1}}$, então $s_k = t_k$ para todo $0 \leq k \leq n+1$, de acordo com a Proposição 2.22. Como $\sigma(s) = (s_1 s_2 s_3 \dots)$ e $\sigma(t) = (t_1 t_2 t_3 \dots)$, temos que as primeiras $n+1$ entradas de $\sigma(s)$ e $\sigma(t)$ são iguais. Novamente, utilizando a Proposição 2.22, temos que $d(\sigma(s), \sigma(t)) \leq \frac{1}{2^n} < \varepsilon$. Como s é um ponto arbitrário em Σ_2 , concluímos que σ é contínua. \square

Proposição 2.25. 1. existem 2^n pontos periódicos de período n .

2. existe um ponto cuja órbita é densa.

3. o conjunto dos pontos periódicos é denso.

Demonstração. 1. Se $s = (s_0 s_1 s_2 \dots)$ é um ponto periódico com período n , então

$$\sigma^k(\sigma^n(s)) = (s_{n+k} s_{n+k+1} s_{n+k+2} \dots) = (s_k s_{k+1} s_{k+2} \dots) = \sigma^k(s)$$

para todo $k \geq 0$. Desse modo, s é formado pela repetição das entradas $s_0 s_1 \dots s_{n-1}$. Pelo Princípio Fundamental da Contagem, existem 2^n sequências distintas para $s_0 s_1 \dots s_{n-1}$ e, portanto, a afirmação está provada.

2. Considere o ponto $s^* = (0 1 00 01 10 11 000 001 \dots)$ formado por todos os blocos de tamanho 1, depois por todos os blocos de tamanho 2, e assim sucessivamente.

Sejam $s \in \Sigma_2$, $\varepsilon > 0$ e $n \geq 1$ tal que $\frac{1}{2^n} < \varepsilon$. É fácil ver que existe $k \geq 0$ de modo que $\sigma^k(s^*)$ e s são iguais nas primeiras $n+1$ entradas. De acordo com a Proposição 2.22, $d(s, \sigma^k(s^*)) \leq \frac{1}{2^n} < \varepsilon$ e, portanto, a afirmação está provada.

3. Sejam $s = (s_0 s_1 s_2 \dots) \in \Sigma_2$, $\varepsilon > 0$ e $n \geq 1$ tal que $\frac{1}{2^n} < \varepsilon$. Considere o ponto periódico t com período $n+1$ formado pela repetição da sequência $s_0 s_1 s_2 \dots s_n$. De acordo com a Proposição 2.22, $d(s, t) \leq \frac{1}{2^n} < \varepsilon$ e, portanto, a afirmação está provada. \square

3 Teorema de Sharkovsky

Definição 3.1. Se I_0, I_1, \dots, I_{n-1} são intervalos fechados, $n > 1$,

1. dizemos que I_0 cobre I_1 , e denotamos por $I_0 \longrightarrow I_1$, se $f(I_0) \supset I_1$.

2. dizemos que I_0, I_1, \dots, I_{n-1} é um caminho entre I_0 e I_{n-1} , e denotamos por $I_0 \longrightarrow I_1 \longrightarrow \dots \longrightarrow I_{n-1}$, se $f(I_i) \supset I_{i+1}$, $i = 0, \dots, n-2$.

3. dizemos que I_0, I_1, \dots, I_{n-1} é um ciclo entre I_0 e I_{n-1} , e denotamos por $I_0 \longrightarrow I_1 \longrightarrow \dots \longrightarrow I_{n-1} \longrightarrow I_0$, se $f(I_i) \supset I_{i+1}$, $i = 0, \dots, n-2$, e $f(I_{n-1}) \supset I_0$.

Lema 3.2. Se $I_0 \longrightarrow I_1$, então $f(I'_0) = I_1$ para algum intervalo fechado $I'_0 \subset I_1$.

Demonstração. Se $I_0 = [a, b]$ e $I_1 = [c, d]$, pelo Teorema do Valor Intermediário, existem $p, q \in I_0$ tais que $f(p) = c$ e $f(q) = d$. Suponha que $p \leq q$ e defina $I'_0 = [a', b']$, onde

$$b' = \inf\{x \in [p, q] : f(x) = d\} \text{ e } a' = \sup\{x \in [p, b'] : f(x) = c\}$$

Sendo f contínua temos que $f(a') = c$ e $f(b') = d$ e, desse modo, $f(I'_0) \supset I_1$. Se $f(x) < c$ para algum $x \in I'_0$, existe $y \in [x, b']$ tal que $f(y) = c$, o que é um absurdo pois nesse caso $y > a'$. Absurdo análogo ocorre se $f(x) > d$ para algum $x \in I'_0$. Portanto, $f(I'_0) = I_1$. \square

Lema 3.3. Se $J_0 \longrightarrow J_1 \longrightarrow \dots \longrightarrow J_{n-1} \longrightarrow J_0$, então existe $p \in J_0$ tal que $f^k(p) \in J_k$, para todo $k = 1, \dots, n-1$, e $f^n(p) = p$.

Demonstração. De acordo com as hipóteses e com a Proposição anterior, temos as seguintes implicações:

$$\begin{aligned} J_0 \longrightarrow J_1 &\Rightarrow \text{ existe } J'_0 \subset J_0 \text{ tal que } f(J'_0) = J_1 \\ J_1 \longrightarrow J_2 &\Rightarrow \text{ existe } J'_1 \subset J'_0 \text{ tal que } f^2(J'_1) = J_2 \\ &\vdots \\ J_{n-2} \longrightarrow J_{n-1} &\Rightarrow \text{ existe } J'_{n-2} \subset J'_{n-3} \text{ tal que } f^{n-1}(J'_{n-2}) = J_{n-1} \\ J_{n-1} \longrightarrow J_0 &\Rightarrow \text{ existe } J'_{n-1} \subset J'_{n-2} \text{ tal que } f^n(J'_{n-1}) = J_0 \end{aligned}$$

Construímos então uma sequência de n intervalos fechados $J_0 \supset J'_0 \supset J'_1 \supset \dots \supset J'_{n-1}$ tal que $f^k(J'_{k-1}) = J_k$, para todo $k = 1, \dots, n-1$, e $f^n(J'_{n-1}) = J_0$. Como $J_0 \supset J'_{n-1}$, existe $p \in J'_{n-1}$ tal que $f^n(p) = p$. Em particular, $p \in J_0$ e $f^k(p) \in J_k$, para todo $k = 1, \dots, n-1$. \square

Teorema 3.4. Se f admite ponto periódico de período principal 3, então f admite ponto periódico de período principal n , para todo $n \geq 1$.

Demonstração. Sejam p um ponto periódico de período principal 3 e $p_1 < p_2 < p_3$ os pontos da órbita de p e suponha que $f(p_1) = p_2$ e $f(p_2) = p_3$. O outro caso possível, em que $f(p_1) = p_3$ e $f(p_3) = p_2$, é demonstrado de maneira análoga. Definindo $I_1 = [p_1, p_2]$ e $I_2 = [p_2, p_3]$, temos que $I_1 \longrightarrow I_2$, $I_2 \longrightarrow I_1$ e $I_2 \longrightarrow I_2$.

(a) $n = 1$: Como $I_2 \longrightarrow I_2$, existe $p \in I_2$ tal que $f(p) = p$.

(b) $n = 2$: Como $I_1 \longrightarrow I_2 \longrightarrow I_1$, existe $p \in I_1$ tal que $f(p) \in I_2$ e $f^2(p) = p$. Se $f(p) = p$, então $p \in I_1 \cap I_2 = \{p_2\}$, o que é um absurdo pois p_2 possui período principal 3. Desse modo, o período principal de p é 2.

- (c) $n > 3$: Se $I_2 \longrightarrow \cdots \longrightarrow I_2 \longrightarrow I_1 \longrightarrow I_2$ é um ciclo de tamanho n , existe $p \in I_2$ tal que $f^k(p) \in I_2$, para todo $k = 1, \dots, n-2$, $f^{n-1}(p) \in I_1$ e $f^n(p) = p$. Se $f^{n-1}(p) = p$, então $p \in I_1 \cap I_2 = \{p_2\}$, o que é um absurdo pois implica que $f(p) = p_3 \in I_1$. Se $f^k(p) = p$ para algum $k = 1, \dots, n-2$ implica que $f^k(p) \in I_2$, para todo $k \geq 1$. Em particular, $f^{n-1}(p) \in I_1 \cap I_2 = \{p_2\}$ e, portanto, $p = f^n(p) = p_3$, o que é um absurdo pois implica que $f(p) = p_1 \in I_2$.

Desse modo, o resultado está provado. \square

Definição 3.5 (Ordenação de Sharkovsky).

$$3 \triangleright 5 \triangleright \cdots \triangleright 2 \cdot 3 \triangleright 2 \cdot 5 \triangleright \cdots \triangleright 2^2 \cdot 3 \triangleright 2^2 \cdot 5 \triangleright \cdots \triangleright 2^k \cdot 3 \triangleright 2^k \cdot 5 \triangleright \cdots \triangleright 2^2 \triangleright 2 \triangleright 1.$$

Teorema 3.6 (Sharkovsky). *Se f admite ponto de período principal n , então f admite ponto de período principal m , para todo $m \triangleleft n$.*

Teorema 3.7. *Para todo $n \geq 1$ existe uma função f que admite ponto periódico de período principal n e que não admite ponto de período principal m se $m \triangleright n$.*

Demonstração. Seja $T : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ a função dada por $T(x) = 1 - |2x - 1|$ e considere a família de funções $T_h(x) = \min\{h, T(x)\}$ definidas em $[0, 1]$, com o parâmetro h variando em $[0, 1]$. Observe que $T_1 = T$, pois $T(x) \leq 1$ para todo $x \in [0, 1]$. Além disso, observando o gráfico de T_1 concluímos que a função possui 2^k pontos periódicos de período k e assim podemos definir, para cada $k \geq 1$,

$$h(k) = \min\{\max\{\mathcal{O} : \mathcal{O} \text{ é uma órbita de tamanho } n \text{ de } T_1\}\}$$

A ideia principal da prova consiste no fato de que $h(k)$ desempenha os papéis de parâmetro, máximo e ponto de uma órbita de $T_{h(k)}$. As seguintes afirmações tornarão preciso esse fato.

- (a) Se $\mathcal{O} \subset [0, h)$ é uma órbita de T_h , então \mathcal{O} é uma órbita de T_1 .

Se $p \in \mathcal{O}$ então $T_h(p) \in [0, h)$. Desse modo, $T_h(p) = \min\{h, T(p)\} = T(p) = T_1(p)$, ou seja, T_h e T_1 coincidem em \mathcal{O} e, portanto, \mathcal{O} é uma órbita de T_1 .

- (b) Se $\mathcal{O} \subset [0, h]$ é uma órbita de T_1 , então \mathcal{O} é uma órbita de T_h .

Se $p \in \mathcal{O}$ então $T_1(p) \in [0, h]$. Desse modo, $T_h(p) = \min\{h, T(p)\} = \min\{h, T_1(p)\} = T_1(p)$, ou seja, T_h e T_1 coincidem em \mathcal{O} e, portanto, \mathcal{O} é uma órbita de T_h .

- (c) $T_{h(k)}$ possui uma órbita $\mathcal{O} \in [0, h(k))$ de tamanho l se e somente se $h(k) > h(l)$.

Se $T_{h(k)}$ possui uma órbita $\mathcal{O} \in [0, h(k))$ de tamanho l , então \mathcal{O} é uma órbita de T_1 por (a) e, pela definição de $h(l)$, concluímos que $h(l) < h(k)$.

Por outro lado, se $h(l) < h(k)$, então T_1 possui uma órbita $\mathcal{O} \subset [0, h(l)] \subset [0, h(k)]$ de tamanho l e, desse modo, \mathcal{O} é uma órbita de $T_{h(k)}$ por (b).

- (d) A órbita de T_1 que contém $h(k)$ é uma órbita de tamanho k de $T_{h(k)}$. Além disso, todas as outras órbitas de $T_{h(k)}$ estão em $[0, h(k))$.

Pela definição de $h(k)$, T_1 possui uma órbita $\mathcal{O} \subset [0, h(k)]$ de tamanho k e, portanto, \mathcal{O} é uma órbita de $T_{h(k)}$ por (b).

Para demonstrar a segunda parte, basta observar que $h(k)$ é o valor máximo de $T_{h(k)}$ e, desse modo, toda órbita de $T_{h(k)}$ está contida em $[0, h(k)]$. Em particular, se a órbita não contém $h(k)$, então ela está contida em $[0, h(k))$.

(e) $k \triangleright l$ se e somente se $h(k) > h(l)$.

Suponha que $k \triangleright l$. Por (d), $T_{h(k)}$ possui uma órbita de tamanho k . De acordo com o Teorema de Sharkovsky e com (d), $T_{h(k)}$ admite uma órbita de tamanho l contida em $[0, h(k))$. Desse modo, $h(k) > h(l)$ por (c).

Por outro lado, suponha que $h(k) > h(l)$. Caso $l \triangleright k$, a demonstração no parágrafo anterior implicaria que $h(k) < h(l)$, contrariando a hipótese. Desse modo, $k \triangleright l$.

Assim, para cada $n \geq 1$, $T_{h(n)}$ possui órbita de tamanho n . Além disso, se $m \triangleright n$ então $h(m) > h(n)$ por (e) e, portanto, $T_{h(n)}$ não possui órbita de tamanho m por (c). \square

4 Derivada de Schwarz

Definição 4.1. Seja $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ uma função de classe \mathcal{C}^3 . A função $\mathcal{S}f$ dada por

$$\mathcal{S}f(x) = \frac{\partial^3 f(x)}{\partial f(x)} - \frac{3}{2} \left(\frac{\partial^2 f(x)}{\partial f(x)} \right)^2$$

para todo x tal que $\partial f(x) \neq 0$ é a derivada de Schwarz de f .

Lema 4.2. Se $\mathcal{S}f < 0$, então $\mathcal{S}f^k < 0$ para todo $k \geq 1$.

Demonstração. Pela Regra da Cadeia, podemos concluir que $\mathcal{S}f^2(x) < 0$ para todo x tal que $\partial f^2(x) \neq 0$. Por indução, $\mathcal{S}f^k < 0$ para todo $k \geq 1$. \square

Lema 4.3. Se $\mathcal{S}f < 0$ e x_0 é um ponto de mínimo local de ∂f , então $\partial f(x_0) \leq 0$.

Demonstração. Se $\partial f(x_0) \neq 0$, então $\mathcal{S}f(x_0) = \frac{\partial^3 f(x_0)}{\partial f(x_0)} - \frac{3}{2} \frac{\partial^2 f(x_0)}{\partial f(x_0)} < 0$. Sendo x_0 ponto de mínimo local de ∂f , temos que $\partial^2 f(x_0) = 0$ e $\partial^3 f(x_0) \geq 0$. Portanto, $\partial f(x_0) < 0$. \square

Lema 4.4. Se $\mathcal{S}f < 0$ e $a < b < c$ são pontos fixos de f , com $\partial f(b) \leq 1$, então f possui ponto crítico em (a, c) .

Demonstração. Pelo Teorema do Valor Médio, existem $r \in (a, b)$ e $s \in (b, c)$ tais que $\partial f(r) = \partial f(s) = 1$. Sendo ∂f contínua, ∂f restrita ao intervalo $[r, s]$ possui mínimo global. Como $b \in (r, s)$ e $\partial f(b) \leq 1$, temos que ∂f possui mínimo local em (r, s) . Utilizando Lema anterior e o Teorema do Valor Intermediário, a demonstração está concluída. \square

Lema 4.5. Se $\mathcal{S}f < 0$ e $a < b < c < d$ são pontos fixos de f , então f possui ponto crítico em (a, d) .

Demonstração. Se $\partial f(b) \leq 1$ ou $\partial f(c) \leq 1$, o resultado é verdadeiro pelo Lema anterior. Se $\partial f(b) > 1$ e $\partial f(c) > 1$, existem $r, t \in (b, c)$ tais que $r < t$, $f(r) > r$ e $f(t) < t$. Pelo Teorema do Valor Médio, existe $s \in (r, t)$ tal que $\partial f(s) < 1$. Portanto, ∂f possui mínimo local em (b, c) . Utilizando Lema 4.3 e o Teorema do Valor Intermediário, a demonstração está concluída. \square

Lema 4.6. *Se f possui finitos pontos críticos, então f^n possui finitos pontos críticos para todo $n \geq 1$.*

Demonstração. Pelo Teorema do Valor Médio, f possui ponto crítico entre dois elementos de $f^{-1}(c)$. Como f possui finitos pontos críticos, $f^{-1}(c)$ é finito. Além disso, se $f^{-k}(c)$ é finito, então $f^{-(k+1)}(c) = \{x \in \mathbb{R} : f(f^k(x)) = c\}$ é finito pois $f^{-1}(c)$ é finito e, por hipótese de indução, $f^{-k}(c_i)$ é finito para cada $c_i \in f^{-1}(c)$. Portanto, $f^{-n}(c)$ é finito para todo $n \geq 1$.

Temos que $(f^n)'(x) = \prod_{k=0}^{n-1} \partial f(f^k(x)) = 0$ se e somente se $f^k(x)$ é ponto crítico de f para algum $k = 1, \dots, n-1$. Assim, o conjunto de pontos críticos de f^n é finito pois é dado pela união dos conjuntos $\cup_{k=0}^{n-1} f^{-k}(c_i)$, onde c_i é ponto crítico de f . \square

Observe que o Lema anterior, ao contrário dos outros, não exige que $\mathcal{S}f < 0$.

Teorema 4.7 (Singer). *Se $\mathcal{S}f < 0$ e f possui n pontos críticos, então f possui no máximo $n+2$ órbitas periódicas não repulsoras.*

Demonstração. Sejam p um ponto periódico não repulsor de f de período m e $g = f^m$. Desse modo, p é um ponto fixo não repulsor de g , ou seja, $g(p) = p$ e $|g'(p)| \leq 1$. Seja K a componente conexa de $B(p) = \{x : \lim_{k \rightarrow \infty} g^k(x) = p\}$ que contém p .

Suponha que K é limitado e $|g'(p)| < 1$. Vamos mostrar que K é aberto, $g(K) \subset K$ e g preserva os pontos extremos de K .

Como $|g'(p)| < 1$, p é um ponto atrator e, portanto, existe uma vizinhança V de p contida em $B(p)$. Além disso, $g(\bar{V}) \subset V$. Sendo g contínua, $g^{-n}(V)$ é um aberto que contém p para todo $n \geq 1$. Como $g^n(p) = p \in V$, considere $g^{-n}(V)^*$ a componente conexa de $g^{-n}(V)$ que contém p .

Observe que, se $x \in K$, existe $n \geq 1$ tal que $g^n(x) \in V$. Desse modo, podemos escrever $K = \cup_{n=0}^{\infty} g^{-n}(V)^*$. Portanto, K é aberto e, por construção, $g(K) \subset K$.

Seja a um ponto extremo de K e suponha que $g(a) \in K$. Desse modo, existe uma vizinhança V de $g(a)$ contida em K . Sendo g contínua, $g^{-1}(V)$ é uma vizinhança de a contida em $B(p)$, o que contraria o fato de K ser a componente conexa de $B(p)$ que contém p . Como $g(K) \subset K$ e g é contínua, concluímos que g preserva os pontos extremos de K .

Desse modo, escrevendo $K = (a, b)$, ocorre um dos três casos abaixo. Vamos mostrar que em cada caso, g possui ponto crítico em K . Observe que $\mathcal{S}g < 0$.

- a) Se $g(a) = a$ e $g(b) = b$, g possui ponto crítico em K pelo Lema 4.4.
- b) Se $g(a) = b$ e $g(b) = a$, considerando $h = g^2$ e utilizando novamente o Lema 4.4, h possui ponto crítico em K . Como $g(K) \subset K$, g possui ponto crítico em K .
- c) Se $g(a) = g(b)$, g possui ponto crítico em K pelo Teorema do Valor Médio.

Suponha que K é limitado e $|g'(p)| = 1$. Pelo Lema anterior, g possui finitos pontos fixos e, portanto, são isolados.

Se $g'(p) = 1$ e, para x numa vizinhança de p , $g(x) > x$ quando $x > p$ e $g(x) < x$ quando $x < p$, então $g'(x^*) > 0$, para x^* próximo de p , é um mínimo local de g' maior que zero, o que contradiz o Lema 4.3. Se $g'(p) = -1$, basta considerar $h = g^2$ e obter o mesmo resultado. Portanto, p é atrator em pelo menos um dos lados. Desse modo, K é um intervalo não trivial, $g(K) \subset K$ e g preserva os pontos extremos de K . Assim, é possível concluir de maneira análoga que g possui ponto crítico em K .

Pela Regra da Cadeia, se g possui ponto crítico $x_0 \in K$, então $f^i(x_0)$ é ponto crítico de f para algum $i = 0, \dots, m-1$. Desse modo, se p é um ponto periódico não repulsor de f cujo intervalo associado K é limitado, então K possui pelo menos um ponto crítico e, como existem n pontos críticos, existem no máximo n intervalos K limitados. Não é possível obter a mesma conclusão se K não é limitado, mas observando que existem no máximo dois intervalos desse tipo, a demonstração está concluída. \square

Corolário 4.8. $F_\mu(x) = \mu x(1-x)$, $\mu > 0$, possui no máximo 1 órbita periódica não repulsora.

Demonstração. Observe que F_μ possui um único ponto crítico em $\frac{1}{2}$. Pelo Teorema de Singer, F_μ possui no máximo 3 órbitas periódicas não repulsoras. Se p é ponto fixo de F_μ e observando que $\lim_{n \rightarrow \infty} |F_\mu^n(x)| = \infty$ quando $|x|$ é suficientemente grande, concluimos que $B(p)$ é limitado. Portanto, F_μ possui no máximo 1 órbita periódica não repulsora. \square

5 Bifurcação

Ao longo de seção, f_λ representará uma família parametrizada de funções no parâmetro λ de modo que a função

$$G(x, \lambda) = f_\lambda(x),$$

definida num aberto de \mathbb{R}^2 , seja de classe \mathcal{C}^∞ nas variáveis x e λ .

Teorema 5.1. *Seja f_λ uma família parametrizada de funções. Suponha que*

1. $f_{\lambda_0}(x_0) = x_0$
2. $f'_{\lambda_0}(x_0) \neq 1$

Então existem vizinhanças I e J de λ_0 e x_0 , respectivamente, e uma função $p : I \rightarrow J$ de classe \mathcal{C}^∞ tais que

1. $p(\lambda_0) = x_0$
2. $f_\lambda(p(\lambda)) = p(\lambda)$ para todo $\lambda \in I$

Além disso, f_λ não possui outros pontos fixos em J .

Demonstração. Seja $G(x, \lambda) = f_\lambda(x) - x$. Observe que x é ponto fixo de f_λ se e somente se $G(x, \lambda) = 0$.

Pelo Teorema da Função Implícita, como $G(x_0, \lambda_0) = 0$ e

$$\frac{\partial G}{\partial x}(x_0, \lambda_0) = f'_{\lambda_0}(x_0) - 1 \neq 0,$$

existem vizinhanças I e J de λ_0 e x_0 , respectivamente, e uma função $p : I \rightarrow J$ de classe \mathcal{C}^∞ tal que $p(\lambda_0) = x_0$ e $G(p(\lambda), \lambda) = 0$ para todo $\lambda \in I$.

Além disso, para cada $\lambda \in I$ está associado um único $x \in J$ e, portanto, $x \in J$ e $G(x, \lambda) = 0$ se e somente se $x = p(\lambda)$. \square

De acordo com o Teorema anterior, se x_0 é um ponto fixo hiperbólico de f_{λ_0} , então f_λ possui um único ponto fixo numa vizinhança de x_0 para cada λ numa vizinhança de λ_0 .

Utilizando a notação do Teorema anterior, considere a função $g_\lambda(x) = f_\lambda(x + p(\lambda)) - p(\lambda)$. Observe que $g_\lambda(0) = f(p(\lambda)) - p(\lambda) = 0$ para todo $\lambda \in I$, ou seja, 0 é ponto fixo de g_λ para todo $\lambda \in I$. Além disso, f_λ e g_λ são topologicamente conjugadas por $h_\lambda(x) = x - p(\lambda)$.

Teorema 5.2 (Bifurcação Tangente). *Suponha que*

1. $f_{\lambda_0}(0) = 0$
2. $f'_{\lambda_0}(0) = 1$
3. $f''_{\lambda_0}(0) \neq 0$
4. $\frac{\partial f_\lambda}{\partial \lambda}|_{\lambda=\lambda_0}(0) \neq 0$

Então existem uma vizinhança I de 0 e uma função $p : I \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^∞ tais que

1. $p(0) = \lambda_0$
2. $f_{p(x)}(x) = x$

Além disso, $p'(0) = 0$ e $p''(0) \neq 0$.

Demonstração. Considere a função $G(x, \lambda) = f_\lambda(x) - x$. Observe que x é um ponto fixo de f_λ se e somente se $G(x, \lambda) = 0$.

Pelo Teorema da Função Implícita, como $G(0, \lambda_0) = 0$ e

$$\frac{\partial G}{\partial \lambda}(0, \lambda_0) = \frac{\partial f_\lambda}{\partial \lambda}|_{\lambda=\lambda_0}(0) \neq 0,$$

existem uma vizinhança I de 0 e uma função $p : I \rightarrow \mathbb{R}$ tais que $p(0) = \lambda_0$ e $G(x, p(x)) = 0$ para todo $x \in I$.

Além disso, pela Regra da Cadeia, é válido que

$$p'(0) = -\frac{\frac{\partial G}{\partial x}(0, \lambda_0)}{\frac{\partial G}{\partial \lambda}(0, \lambda_0)} = -\frac{f'_{\lambda_0}(0) - 1}{\frac{\partial f_\lambda}{\partial \lambda}|_{\lambda=\lambda_0}(0)} = 0$$

e

$$p''(0) = -\frac{\frac{\partial^2 G}{\partial x^2}(0, \lambda_0) \frac{\partial G}{\partial \lambda}(0, \lambda_0) - \frac{\partial G}{\partial x}(0, \lambda_0) \frac{\partial^2 G}{\partial x \partial \lambda}(0, \lambda_0)}{\left(\frac{\partial G}{\partial \lambda}(0, \lambda_0)\right)^2} = -\frac{\frac{\partial^2 G}{\partial x^2}(x, \lambda_0)}{\frac{\partial f_\lambda}{\partial \lambda}|_{\lambda=\lambda_0}(0)} \neq 0$$

\square

No Teorema anterior, se $p''(0) > 0$, então a concavidade de p é para cima. Esboçando o gráfico de p , podemos observar que f não possui pontos fixos para $\lambda < \lambda_0$, possui um único ponto fixo para $\lambda = \lambda_0$ e possui dois pontos fixos para $\lambda > \lambda_0$. Se $p''(0) < 0$, a concavidade de p é para baixo e a conclusão é análoga, invertendo os sentidos.

Teorema 5.3 (Bifurcação com Duplicação de Período). *Suponha que*

1. $f_{\lambda_0}(0) = 0$ para todo λ numa vizinhança de λ_0
2. $f'_{\lambda_0}(0) = -1$
3. $\frac{\partial(f_{\lambda}^2)'}{\partial\lambda}|_{\lambda=\lambda_0}(0) \neq 0$
4. $S_{f_{\lambda_0}}(0) \neq 0$

Então existem uma vizinhança I de 0 e uma função $p : I \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^∞ tais que

1. $p(0) = \lambda_0$
2. $f_{p(x)}(x) \neq x$ para todo $x \in I$
3. $f_{p(x)}^2(x) = x$ para todo $x \in I$

Além disso, $p'(0) = 0$ e $p''(0) \neq 0$.

Demonstração. Seja $G(x, \lambda) = f_{\lambda}^2(x) - x$. Sendo $G(0, \lambda) = 0$ para todo λ numa vizinhança de λ_0 , temos que

$$\frac{\partial G}{\partial \lambda}(0, \lambda_0) = 0$$

e, portanto, não podemos utilizar o Teorema da Função Implícita diretamente. Seja

$$H(x, \lambda) = \begin{cases} \frac{G(x, \lambda)}{x} & \text{se } x \neq 0 \\ \frac{\partial G}{\partial x}(0, \lambda) & \text{se } x = 0 \end{cases}$$

Desse modo, H é de classe \mathcal{C}^∞ e são válidas as igualdades

- (I) $H(0, \lambda_0) = \frac{\partial G}{\partial x}(0, \lambda_0) = (f_{\lambda_0}^2)'(0) - 1 = f'_{\lambda_0}(f_{\lambda_0}(0))f'_{\lambda_0}(0) - 1 = 0$
- (II) $\frac{\partial H}{\partial \lambda}(0, \lambda_0) = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{\partial G}{\partial x}(0, \lambda) \right) |_{\lambda=\lambda_0} = \frac{\partial}{\partial \lambda} ((f_{\lambda}^2)'(0) - 1) |_{\lambda=\lambda_0} = \frac{\partial(f_{\lambda}^2)'}{\partial \lambda} |_{\lambda=\lambda_0}(0) \neq 0$
- (III) $\frac{\partial H}{\partial x}(0, \lambda_0) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G}{\partial x^2}(0, \lambda_0)$
- (IV) $\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}(0, \lambda_0) = \frac{1}{3} \frac{\partial^3 G}{\partial x^3}(0, \lambda_0)$

Para provar as igualdades (III) e (IV), observe que podemos escrever

$$G(x, \lambda) = G(0, \lambda) + x \frac{\partial G}{\partial x}(0, \lambda) + \frac{x^2}{2} \frac{\partial^2 G}{\partial x^2}(0, \lambda) + \frac{x^3}{6} \frac{\partial^3 G}{\partial x^3}(0, \lambda) + \dots$$

para todo x numa vizinhança de 0 e para λ fixado numa vizinhança de λ_0 , utilizando a Série de Taylor. Sendo $G(0, \lambda) = 0$, podemos escrever

$$H(x, \lambda) = \frac{\partial G}{\partial x}(0, \lambda) + \frac{x}{2} \frac{\partial^2 G}{\partial x^2}(0, \lambda) + \frac{x^2}{6} \frac{\partial^3 G}{\partial x^3}(0, \lambda) + \dots$$

para $x \neq 0$ nessa vizinhança. Portanto, H é de classe \mathcal{C}^∞ . Escrevendo a Série de Taylor de H numa vizinhança de 0 e igualando os termos correspondentes, concluímos que $\frac{\partial H}{\partial x}(0, \lambda_0) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G}{\partial x^2}(0, \lambda_0)$ e $\frac{1}{2} \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}(0, \lambda_0) = \frac{1}{6} \frac{\partial^3 G}{\partial x^3}(0, \lambda_0)$.

Pelas igualdades (I) e (II), e pelo Teorema da Função Implícita, existem uma vizinhança I de 0 e uma função $p : I \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^∞ tais que $p(0) = \lambda_0$ e $H(x, p(x)) = 0$ para todo $x \in I$. Em particular, se $x \neq 0$,

$$0 = \frac{G(x, p(x))}{x} = \frac{f_{p(x)}^2(x) - x}{x}$$

ou seja, $f_{p(x)}^2(x) = x$ para todo $x \in I$. Além disso, pelo Teorema 5.1, f_λ possui um único ponto fixo numa vizinhança de 0 e, portanto, podemos considerar que $f_{p(x)}(x) \neq x$ para todo $x \in I$, $x \neq 0$.

Como

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 G}{\partial x^2}(0, \lambda_0) &= (f_{\lambda_0})''(x)|_{x=0} \\ &= [f'_{\lambda_0}(f_{\lambda_0}(x))f'_{\lambda_0}(x)]'|_{x=0} \\ &= [f''_{\lambda_0}(f_{\lambda_0}(x))(f'_{\lambda_0}(x))^2 + f'_{\lambda_0}(f_{\lambda_0}(x))f''_{\lambda_0}(x)]|_{x=0} \\ &= f''_{\lambda_0}(f_{\lambda_0}(0)) - f''_{\lambda_0}(0) = 0 \end{aligned}$$

temos que

$$p'(0) = -\frac{\frac{\partial H}{\partial x}(0, \lambda_0)}{\frac{\partial H}{\partial \lambda}(0, \lambda_0)} = -\frac{1}{2} \frac{\frac{\partial^2 G}{\partial x^2}(0, \lambda_0)}{\frac{\partial H}{\partial \lambda}(0, \lambda_0)} = 0$$

Por fim,

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 G}{\partial x^3}(0, \lambda_0) &= [f''_{\lambda_0}(f_{\lambda_0}(x))(f'_{\lambda_0}(x))^2 + f'_{\lambda_0}(f_{\lambda_0}(x))f''_{\lambda_0}(x)]'|_{x=0} \\ &= [f'''_{\lambda_0}(f_{\lambda_0}(x))(f'_{\lambda_0}(x))^3 + 2f''_{\lambda_0}(f_{\lambda_0}(x))f'_{\lambda_0}(x)f''_{\lambda_0}(x) + f''_{\lambda_0}(f_{\lambda_0}(x))f'_{\lambda_0}(x)f''_{\lambda_0}(x) \\ &\quad + f'_{\lambda_0}(f_{\lambda_0}(x))f'''_{\lambda_0}(x)]|_{x=0} \\ &= f'''_{\lambda_0}(0)(f'_{\lambda_0}(0))^3 + 2(f''_{\lambda_0}(0))^2 f'_{\lambda_0}(0) + (f''_{\lambda_0}(0))^2 f'_{\lambda_0}(0) + f'_{\lambda_0}(0)f'''_{\lambda_0}(0) \\ &= -2f'''_{\lambda_0}(0) - 3(f''_{\lambda_0}(0))^2 \\ &= 2\frac{f'''_{\lambda_0}(0)}{f'_{\lambda_0}(0)} - 3\left(\frac{f''_{\lambda_0}(0)}{f'_{\lambda_0}(0)}\right)^2 = 2S_{f_{\lambda_0}}(0) \end{aligned}$$

e, portanto,

$$p''(0) = -\frac{\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}(0, \lambda_0) \frac{\partial H}{\partial \lambda}(0, \lambda_0)}{\left(\frac{\partial H}{\partial \lambda}(0, \lambda_0)\right)^2} = -\frac{1}{3} \frac{\frac{\partial^3 G}{\partial x^3}(0, \lambda_0)}{\frac{\partial H}{\partial \lambda}(0, \lambda_0)} = -\frac{2}{3} \frac{S_{f_{\lambda_0}}(0)}{\frac{\partial H}{\partial \lambda}(0, \lambda_0)} \neq 0.$$

□

6 Subshift

Seja $N \geq 2$. Definimos o conjunto Σ_N formado pelas sequências de números naturais limitados entre 1 e N . Precisamente,

$$\Sigma_N = \{(x_n)_{n=0}^\infty \in \mathbb{N}^\mathbb{N} : 1 \leq x_n \leq N \text{ para todo } n \geq 0\}.$$

Definimos também a função $d_N : \Sigma_N \times \Sigma_N \rightarrow \mathbb{R}$ que é dada por

$$d_N(x, y) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{|x_i - y_i|}{N^i},$$

onde $x = (x_n)_{n=0}^\infty$ e $y = (y_n)_{n=0}^\infty$. Como $\sum_{i=0}^{\infty} \frac{N-1}{N^i} < \infty$, temos que d_N está bem definida.

Proposição 6.1. (Σ_N, d_N) é um espaço métrico.

Demonstração. Se $x = (x_n)_{n=0}^\infty, y = (y_n)_{n=0}^\infty, z = (z_n)_{n=0}^\infty \in \Sigma_N$, então

1. $d_N(x, y) \geq 0$, pois $|x_i - y_i| \geq 0$ para todo $i \geq 0$.
2. $d_N(x, y) = d_N(y, x)$, pois $|x_i - y_i| = |y_i - x_i|$ para todo $i \geq 0$.
3. $d_N(x, z) \leq d_N(x, y) + d_N(y, z)$, pois $|x_i - z_i| = |x_i - y_i + y_i - z_i| \leq |x_i - y_i| + |y_i - z_i|$ para todo $i \geq 0$.

Desse modo, d_N é uma distância em Σ_N e (Σ_N, d_N) é um espaço métrico. □

Proposição 6.2. Sejam $x = (x_n)_{n=0}^\infty, y = (y_n)_{n=0}^\infty \in \Sigma_N$.

1. Se $x_i = y_i$ para todo $0 \leq i \leq k$, então $d_N(x, y) \leq \frac{1}{N^k}$.
2. Se $d_N(x, y) < \frac{1}{N^k}$, então $x_i = y_i$ para todo $0 \leq i \leq k$.

Demonstração. 1. Se $x_i = y_i$ para todo $0 \leq i \leq k$, então

$$d_N(x, y) \leq \sum_{i=k+1}^{\infty} \frac{N-1}{N^i} = \frac{N-1}{N^{k+1}} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{N^i} = \frac{N-1}{N^{k+1}} \frac{N}{N-1} = \frac{1}{N^k}.$$

2. Se $x_j \neq y_j$ para algum $0 \leq j \leq k$, então

$$d_N(x, y) \geq \frac{1}{N^j} \geq \frac{1}{N^k}.$$

□

Definimos a função shift $\sigma : \Sigma_N \rightarrow \Sigma_N$ que é dada por $\sigma(x) = (x_n)_{n=1}^\infty$ para todo $x = (x_n)_{n=0}^\infty \in \Sigma_N$, isto é, $\sigma(x_0, x_1, \dots) = (x_1, x_2, \dots)$.

Proposição 6.3. σ é contínua.

Demonstração. Sejam $\varepsilon > 0$ e $x = (x_n)_{n=0}^\infty \in \Sigma_N$. Seja $k \geq 1$ tal que $\frac{1}{N^k} < \varepsilon$ e defina $\delta = \frac{1}{N^{k+1}}$.

Pela Proposição anterior, se $y = (y_n)_{n=0}^\infty \in \Sigma_N$ e $d_N(x, y) < \delta$, então $x_i = y_i$ para todo $i = 0, \dots, k+1$. Desse modo, $\sigma(x)$ e $\sigma(y)$ coincidem nas k primeiras entradas. Utilizando a Proposição anterior novamente, concluímos que $d_N(\sigma(x), \sigma(y)) \leq \frac{1}{N^k} < \varepsilon$. \square

Seja $A = (a_{ij})_{1 \leq i, j \leq N}$ uma matriz quadrada de ordem N tal que $a_{ij} \in \{0, 1\}$ para todo $1 \leq i, j \leq N$. Dizemos que A é uma matriz de transição. Definimos o conjunto Σ_A como

$$\Sigma_A = \{(x_n)_{n=0}^\infty \in \Sigma_N : a_{x_i x_{i+1}} = 1 \text{ para todo } i \geq 0\}.$$

Seja $x = (x_n)_{n=0}^\infty \in \Sigma_A$. Observando que $a_{x_i x_{i+1}} = 1$ para todo $i \geq 1$, temos que $\sigma(x) = (x_n)_{n=1}^\infty \in \Sigma_A$. Desse modo, podemos definir a função $\sigma_A : \Sigma_A \rightarrow \Sigma_A$ como sendo a restrição de σ em Σ_A . Dizemos que σ_A é o subshift definido por A .

Proposição 6.4. Σ_A é um subconjunto fechado de Σ_N .

Demonstração. Seja $(x_n)_{n=0}^\infty$ uma sequência de elementos em Σ_A convergente para $x = (\xi_n)_{n=0}^\infty \in \Sigma_N$. Observe que a sequência $(x_n)_{n=0}^\infty$ é uma sequência de sequências, pois cada x_n é elemento de Σ_N .

Suponha que $x \notin \Sigma_A$. Então, existe $j \geq 0$ tal que $a_{\xi_j \xi_{j+1}} = 0$. Por outro lado, pela definição de convergência, existe $n_0 \geq 0$ tal que $d(x_{n_0}, x) < \frac{1}{N^{j+1}}$ e, portanto, as $j+2$ primeiras entradas de x e x_{n_0} são iguais. Escrevendo $x_{n_0} = (\eta_n)_{n=0}^\infty$, concluímos que $a_{\eta_j \eta_{j+1}} = a_{\xi_j \xi_{j+1}} = 0$. Absurdo, pois $x_{n_0} \in \Sigma_A$. \square

No restante dessa seção vamos estudar a dinâmica da função quadrática $F_\mu(x) = \mu x(1-x)$, onde o parâmetro $\mu = 3.839$ está fixado. Será omitido μ na notação da função e escreveremos apenas F .

Sejam $a = 0.149888$, $\varepsilon = 10^{-3}$ e $I = (a - \varepsilon, a + \varepsilon)$. Através de cálculos é possível mostrar que $F^3(I) \subset I$ e $|(F^3)'(I)| \leq |(F^3)'(a - \varepsilon)| < 1$ e, portanto, o intervalo I possui um ponto periódico atrator de F de período 3. Se a_1, a_2 e a_3 são os elementos dessa órbita em ordem crescente, então

$$a_1 \simeq 0.149888, a_2 \simeq 0.489149 \text{ e } a_3 \simeq 0.959299.$$

De acordo com o Teorema de Sharkovsky, F possui infinitos pontos periódicos. Além disso, de acordo com o Teorema de Singer, essa é a única órbita atratora de F .

De modo análogo, concluímos que F possui outra órbita de tamanho 3. Se b_1, b_2 e b_3 são os elementos dessa órbita em ordem crescente, então

$$b_1 \simeq 0.169040, b_2 \simeq 0.539247 \text{ e } b_3 \simeq 0.953837.$$

Observando o gráfico de F^3 , concluímos que para cada b_i , existe b'_i no lado oposto de b_i em relação ao ponto a_i tal que $F^3(b'_i) = b_i$. Defina $A_1 = (b'_1, b_1)$, $A_2 = (b'_2, b_2)$ e $A_3 = (b_3, b'_3)$. Cada A_i é exatamente o intervalo maximal contendo a_i utilizado na demonstração do Teorema de Singer.

Figura: Gráfico de F^3 com os pontos a_1, a_2 e a_3 assinalados.

Sendo F^3 simétrica em relação ao ponto $\frac{1}{2}$, temos que $F(b'_2) = F(b_2) = b_3$. Além disso, $F(b'_1) = b'_2$ e $F(b'_3) = b'_1$.

Desse modo, F mapeia, de forma monótona, A_1 em A_2 e A_3 em A_1 . Observando que o máximo de F em A_2 é $F(\frac{1}{2}) = 0.95975 < b'_3$, concluímos que $F(A_2) \subset A_3$.

Sabemos que se $x \notin [0, 1]$, então $\lim_{n \rightarrow \infty} F^n(x) = -\infty$. Além disso, o único ponto periódico de A_i é a_i e todos os pontos em A_i tendem para a órbita de a_i . Desse modo, todos os outros pontos periódicos de F residem no complemento de $A_1 \cup A_2 \cup A_3$ em $[0, 1]$, que é formado por quatro intervalos fechados. Sejam $I_0 = [0, b'_1]$, $I_1 = [b_1, b'_2]$, $I_2 = [b_2, b_3]$ e $I_3 = [b'_3, 1]$ tais intervalos. A Proposição a seguir nos permite dizer mais.

Proposição 6.5. *Se $x \notin \{0, a_1, a_2, a_3\}$ é um ponto periódico de F , então $x \in I_1 \cup I_2$.*

Demonstração. Observando que F é monótona em cada I_k , temos que $F(I_0) = I_0 \cup A_1 \cup I_1$, $F(I_1) = I_2$, $F(I_2) = I_1 \cup A_2 \cup I_2$ e $F(I_3) = I_0$. Desse modo, se $x \in I_1 \cup I_2$ é periódico, então órbita de x permanece em $I_1 \cup I_2$.

Por outro lado, se $x \in I_0 - \{0\}$, existe um menor $n \geq 1$ tal que $F^n(x) \notin I_0$. Se $F^n(x) \in A_1$, então x não pode ser periódico, pois o único ponto periódico de A_1 é a_1 . Se $F^n(x) \in I_1$, então x não pode ser periódico, pois caso contrário a órbita de x estaria contida em $I_1 \cup I_2$ e nunca retornaria para I_0 .

Finalmente, se $x \in I_3$, então $F(x) \in I_0$ e a análise segue como no parágrafo anterior. \square

Defina o conjunto Λ como

$$\Lambda = \{x \in I_1 \cup I_2 : F^n(x) \in I_1 \cup I_2 \text{ para todo } n \geq 1\}.$$

Pela Proposição anterior, todos os pontos periódicos de F estão em Λ , com exceção dos pontos $0, a_1, a_2$ e a_3 .

Lema 6.6. *Existe $N \geq 1$ tal que $|(F^n)'(\Lambda)| > 1$ para todo $n \geq N$.*

Demonstração. Como $F'' < 0$, temos que F' é estritamente decrescente. Sendo $F'(\frac{1}{2}) = 0$, concluímos que A_2 é uma vizinhança da única raiz de F' . Além disso, $|(F^3)'(b_2)| = |(F^3)'(b'_2)| \simeq 0.3$. Desse modo, $|F'(I_1 \cup I_2)| \geq \nu$ para algum $\nu \in (0, 1)$.

Observando o gráfico de F^3 , concluímos que o subconjunto de $I_1 \cup I_2$ no qual $|F'| \leq 1$ é formado por três intervalos fechados. Sejam B_1, B_2 e B_3 tais intervalos, numerados da esquerda para direita. Utilizando a simetria do gráfico de F^3 e o fato de que $(F^3)'(b_1) > 1$, temos que $F^3(B_3) \subset A_1$ e, portanto, $B_3 \cap \Lambda = \emptyset$.

Por outro lado, $B_2 \subset [0.661, 0.683]$, já que $(F^3)'(0.661) > 1$ e $(F^3)'(0.683) < -1$. Desse modo, $F(B_2) \subset A_3$. Utilizando novamente a simetria do gráfico de F^3 , concluímos que $F(B_1) \subset A_3$. Portanto, $B_1 \cap \Lambda = \emptyset$ e $B_2 \cap \Lambda = \emptyset$. Assim, $|(F^3)'(\Lambda)| \geq \lambda$ para algum $\lambda > 1$. Observe que se $x \in \Lambda$ e $L \geq 1$, então

$$\left| (F^{3L})'(x) \right| = \prod_{i=0}^{L-1} \left| (F^3)'(F^{3i}(x)) \right| \geq \lambda^L.$$

Finalmente, sejam $x \in \Lambda$ e $K \geq 1$ tal que $\nu^2 \lambda^K > 1$. Se $N = 3K$ e $n \geq N$, podemos escrever $n = 3L + \alpha$, onde $L \geq K$ e $\alpha \in \{0, 1, 2\}$. Desse modo,

i. se $\alpha = 0$, então

$$|(F^n)'(x)| = |(F^{3L})'(x)| \geq \lambda^L \geq \lambda^K > 1.$$

ii. se $\alpha = 1$, então

$$|(F^n)'(x)| = |F'(F^{3L}(x))| |(F^{3L})'(x)| \geq \nu \lambda^L > \nu^2 \lambda^K > 1.$$

iii. se $\alpha = 2$, então

$$|(F^n)'(x)| = |F'(F^{3L+1}(x))| |F'(F^{3L}(x))| |(F^{3L})'(x)| \geq \nu^2 \lambda^L \geq \nu^2 \lambda^K > 1.$$

□

Para as demonstrações dos próximos resultados, vamos considerar a matriz de transição

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Podemos definir a função $S : \Lambda \rightarrow \Sigma_A$ por $S(x) = (x_n)_{n=0}^\infty$, onde $x_i = 1$ se $F^i(x) \in I_1$ e $x_i = 2$ se $F^i(x) \in I_2$ para todo $i \geq 0$. Observe que está S bem definida, pois $F(I_1) = I_2$ e $F(I_2) \subset I_1 \cup I_2$ e, portanto, $a_{x_i x_{i+1}} = 1$ para todo $i \geq 0$.

Lema 6.7. Λ não contém intervalos.

Demonstração. Suponha que Λ contém algum intervalo e sejam $a, b \in \Lambda$, com $a < b$, tais que $[a, b] \subset \Lambda$. Utilizando a notação do Lema anterior, seja $k \geq N$ tal que $(b-a)\nu^N \lambda^{k-N} > 1$. Pelo Teorema do Valor Médio, existe $c \in [a, b]$ tal que

$$\begin{aligned} |F^k(b) - F^k(a)| &= |(F^k)'(c)|(b-a) \\ &= \left| \prod_{i=0}^{k-1} F'(F^i(c)) \right| (b-a) \\ &= \left| \prod_{i=0}^{N-1} F'(F^i(c)) \right| \left| \prod_{i=N}^{k-1} F'(F^i(c)) \right| (b-a) \\ &\geq \nu^N \lambda^{k-N} (b-a) > 1 \end{aligned}$$

e, portanto, $F^k(a)$ ou $F^k(b)$ não é elemento de $[0, 1]$, o que é um absurdo. □

Proposição 6.8. S é um homeomorfismo.

Demonstração. i. S é injetora:

Sejam $x, y \in \Lambda$, com $x < y$, e suponha que $S(x) = S(y)$. Desse modo, $F^n(x)$ e $F^n(y)$ está no mesmo lado em relação ao ponto crítico $\frac{1}{2}$ e, portanto, F é monótona no intervalo J_n , cujos pontos extremos são $F^n(x)$ e $F^n(y)$, para todo $n \geq 0$. Desse modo, se $z \in [x, y]$, então $F^n(z) \in J_n \subset I_1 \cup I_2$ para todo $n \geq 0$ e, portanto, $z \in \Lambda$. Mas isso implica que $[x, y] \subset \Lambda$, o que é um absurdo.

ii. S é sobrejetora:

Seja $(x_n)_{n=0}^\infty \in \Sigma_A$. Vamos provar que existe $x \in \Lambda$ tal que $S(x) = (x_n)_{n=0}^\infty$.

Inicialmente, para cada $n \geq 0$, considere

$$I_{x_0 \dots x_n} = \{x \in [0, 1] : x \in I_{x_0}, \dots, F^n(x) \in I_{x_n}\}.$$

Observe que $x \in I_{x_0 \dots x_n}$ se, e somente se, $x \in I_{x_0}$ e $F(x) \in \{y \in [0, 1] : y \in I_{x_1}, \dots, F^{n-1}(y) \in I_{x_n}\}$. Desse modo, $I_{x_0 \dots x_n} = I_{x_0} \cap F^{-1}(I_{x_1 \dots x_n})$.

Assim, por indução, é possível concluir que $I_{x_0 \dots x_n}$ é um intervalo fechado não vazio. Além disso, $I_{x_0 \dots x_n} = I_{x_0 \dots x_{n-1}} \cap F^{-n}(I_{x_n}) \subset I_{x_0 \dots x_{n-1}}$.

Desse modo, $(I_{x_0 \dots x_n})_{n=0}^\infty$ é uma sequência de intervalos encaixantes fechados e não vazios e, portanto, existe $x \in \bigcap_{n=0}^\infty I_{x_0 \dots x_n}$. Como $F^i(x) \in I_{x_i}$ para todo $i \geq 0$, concluímos que $S(x) = (x_n)_{n=0}^\infty$. Observe que $x \in \bigcap_{n=0}^\infty I_{x_0 \dots x_n}$ é único, pois S é injetora.

iii. S é contínua:

Seja $x \in \Lambda$, com $S(x) = (x_n)_{n=0}^\infty$. Sejam também $\varepsilon > 0$ e $k \geq 1$ tal que $\frac{1}{N^k} < \varepsilon$.

Como $I_{x_0 \dots x_k}$ um intervalo fechado e $x \in I_{x_0 \dots x_k}$, tome $\delta > 0$ tal que $y \in \Lambda$ e $|x - y| < \delta$ implica que $y \in I_{x_0 \dots x_k}$. Desse modo, $S(x)$ e $S(y)$ são iguais nas primeiras $k + 1$ entradas e, portanto, $d_N(S(x), S(y)) \leq \frac{1}{N^k} < \varepsilon$.

□

Teorema 6.9. $S \circ F|_\Lambda = \sigma_A \circ S$.

Demonstração. Seja $x \in \Lambda$. Utilizando a notação da Proposição anterior, se $S(x) = (x_n)_{n=0}^\infty$, então x é o único elemento de $\bigcap_{n=0}^\infty I_{x_0 \dots x_n}$.

Podemos escrever $I_{x_0 \dots x_n} = I_{x_0} \cap F^{-1}(I_{x_1}) \cap \dots \cap F^{-n}(I_{x_n})$. Se $x_0 = 1$, então $x_1 = 2$ e, portanto, $F(I_{x_0}) = I_{x_1}$. Se $x_0 = 2$, então $F(I_{x_0}) = I_1 \cup A_2 \cup I_2$. Em ambos os casos, $F(I_{x_0}) \supset I_{x_1}$ e, desse modo,

$$F(I_{x_0 \dots x_n}) = I_{x_1} \cap \dots \cap F^{-n+1}(I_{x_n}).$$

Portanto,

$$\begin{aligned} S \circ F|_\Lambda(x) &= S(F(\bigcap_{n=0}^\infty I_{x_0 \dots x_n})) \\ &= S(\bigcap_{n=1}^\infty I_{x_1 \dots x_n}) \\ &= (x_n)_{n=1}^\infty = \sigma \circ S(x) \end{aligned}$$

□

Proposição 6.10. *Seja A uma matriz de transição de ordem N . Então σ_A possui $\text{Tr}(A^k)$ pontos periódicos de período k .*

Demonstração. Observe que $x = (x_n)_{n=0}^\infty \in \Sigma_N$ é um ponto periódico de período k de σ se, e somente se, $x_i = x_{i+k}$ para todo $i \geq 0$, ou seja,

$$x = (x_0, x_1, \dots, x_{k-1}, x_0, x_1, \dots, x_{k-1}, \dots).$$

Desse modo, $x \in \Sigma_A$ se, e somente se, $a_{x_0x_1} = a_{x_1x_2} = \dots = a_{x_{k-1}x_0} = 1$ e, portanto,

$$\begin{cases} a_{x_0x_1} a_{x_1x_2} \dots a_{x_{k-1}x_0} = 1, & \text{se } x \in \Sigma_A \\ a_{x_0x_1} a_{x_1x_2} \dots a_{x_{k-1}x_0} = 0, & \text{se } x \notin \Sigma_A \end{cases}$$

Assim, a quantidade de pontos periódicos de período k de σ_A é dada por

$$\sum_{1 \leq x_0, \dots, x_{k-1} \leq N} a_{x_0x_1} a_{x_1x_2} \dots a_{x_{k-1}x_0}.$$

Por outro lado, utilizando a definição de multiplicação de matrizes podemos mostrar por indução que $A^k = (c_{ij})_{1 \leq i, j \leq N}$, onde

$$c_{ij} = \sum_{1 \leq x_1, \dots, x_{k-1} \leq N} a_{ix_1} a_{x_1x_2} \dots a_{x_{k-1}j}$$

e, portanto,

$$\text{Tr}(A^k) = \sum_{x_0=1}^N c_{x_0x_0} = \sum_{1 \leq x_0, \dots, x_{k-1} \leq N} a_{x_0x_1} a_{x_1x_2} \dots a_{x_{k-1}x_0}.$$

□