

Soluciones Periódicas a Ecuaciones con Medidas mediante el Método Shoothing.

Fernando D. Mazzone. ¹

Sonia E. Acinas. ²

Lorenzo F. Sierra. ³

Debe haber una formato para las tesis.
Generalmente en la caràtula aparece el postulante
y debajo los directores

¹SECyT-UNRC, FCEyN-UNLPam and CONICET.

²FCEyN-UNLPam and CONICET

³FCEyN-UNLPam.

Dedicatoria

Agradecimientos

Sería bueno que agradezcas también a la UNLPam y a la UNSL por darte la oportunidad de realizar estudios de posgrado, a los profesores de la maestría, a la facultad por el financiamiento recibido por el proyecto. También puedes agradecer a tus afectos, generalmente se dice “por la paciencia que te tuvieron todos estos años”, en finesto es personal tuyo pero es bueno recordar acordarse de todo lo que contribuyó al logro.v Por ahí me olvido de algo

En primer lugar quisiera agradecer al Dr. Fernando Mazzone y a la Dra. Sonia Acinas, por haberme guiado en la realización de esta tesis, por el tiempo dedicado, por su constante ayuda y paciencia.

Al Cluster Tecnológico Río Cuarto por brindar acceso a “Dorotea”: un equipo de análisis de datos de última generación con una gran capacidad de procesamiento de cómputos, destinado a fomentar el desarrollo de modelos de IA.

Índice general

1. Introducción	13
2. Medida de Lebesgue-Stieltjes	17
2.1. Funciones de variación acotada	17
2.2. Medida de Lebesgue-Stieltjes	19
2.2.1. Medida de Lebesgue-Stieltjes en \mathbb{R}	19
2.2.2. Medida de Lebesgue-Stieltjes en un dominio acotado	21
2.3. Medida de Lebesgue-Stieltjes con signo	22
3. Soluciones periódicas a MDE	27
3.1. Ecuaciones diferenciales con medidas vectoriales	27
3.1.1. Medidas vectoriales	28
3.1.2. Soluciones a ecuaciones con medidas vectoriales . .	29
3.2. Existencia de Soluciones a MDE	32
3.2.1. Soluciones locales	32
3.2.2. Extensión de las soluciones	33
3.2.3. Teorema de Cambio de Variables	33
3.3. Método Shooting	42
3.3.1. Desigualdad de Gronwall	42
3.3.2. Operador de Poincaré	47
4. Experimentos Numéricos	53
4.1. Método Numérico	53
4.2. Simulaciones	58
A. Método Shooting	61

Comentarios gamas de magenta

Replaced: Stieltjes	7
Highlighted: de la pelota raqueta	13
Highlighted: motores de arena	13
Replaced: aquel	13
Commented: Para mi no iría coma aquí	13
Commented: Está en rojo	13
Commented: Le buscaría un sinónimo a actúa, está [...]	13
Highlighted: infinitos	14
Deleted: puedo	14
Commented: ya está dicho	15
Replaced: consiste	15
Added: la	17

Replaced: como	17
Added: la	17
Commented: Pondría en otro lado esta notación de [...]	17
Commented: En esta y las definiciones de abajo, no [...]	18
Added: donde el supremo se toma sobre todas [...]	18
Added: La variación nos permite introducir u [...]	18
Added: El espacio de las funciones de variac [...]	18
Added: Podemos dotar a $BV_\alpha([0, T], \mathbb{R}^n)$ de [...]	18
Commented: Me parece que este y el inciso que sig [...]	18
Replaced: . Como toda sucesión de Cauchy es acotada,	19
Added: Lema	19
Replaced: Primer Teorema de Helly	19
Replaced: (ver [18])	19
Commented: Va a quedar mejor si identificas con [...]	19
Replaced: subsucesión	19
Replaced: . Una sucesión de Cauchy que posee [...]	19
Commented: Me parece que va a quedar mejor así, [...]	19
Replaced: Stieltjes	19
Commented: Revisa por otros Stieltjes	19
Replaced: Lebesgue	19
Replaced: no decreciente	19
Commented: El creciente que debería sustituirse por [...]	19
Replaced: no crecientes	19
Replaced: es	19
Added: Vamos a recordar un procedimiento g [...]	19
Added: de subconjuntos de X , es decir \mathcal{A} es [...]	20
Commented: Aca traería la cuestión de la medida [...]	20
Replaced: denotar	20
Commented: En lugar de creciente deberías decir [...]	20
Replaced: ,	20
Deleted: ,	20
Replaced: Proposición	21
Commented: Al principio de todo habías definido [...]	21
Commented: Estas observaciones las citas después?	21
Commented: Lo que viene, no sería más apropiado [...]	22
Commented: Sería más enfático sobre, estuve rato [...]	22
Replaced: Stieltjes	22
Commented: El título dice medidas de Lebesgue- [...]	22
Commented: Me parece que o bien μ es medida (sin [...]	22
Commented: Aca también hay que o decir que son [...]	22
Replaced: STIELTJES	23
Commented: Pasaría esta definición y la observac [...]	23
Commented: No se porque definis esto aquí, me pa [...]	23
Commented: No es común ni frecuente en la literatura [...]	23
Commented: Enfatiza los conceptos que definis. En [...]	23
Commented: la primera y la última son bastante [...]	23
Added: Recordemos a los bien conocidos espa [...]	23
Replaced: sobrentendido	23
Replaced: denotará	23
Commented: Que μ era una medida de Borel posit [...]	24
Commented: Para mi esta definición no hace falta, [...]	24

Replaced: Nikodym	24
Commented: Hay que revisar la definición, pero en [...]	24
Added: de Radon-Nikodym	24
Added: a	24
Replaced: denota	24
Commented: punto y aparte	24
Replaced: Teorema	24
Replaced: demostrada	24
Deleted: y finita,	24
Replaced: $f \in L^1(\mu)$	24
Added: definimos	24
Added: ν es una medida con signo absolutam [...]	24
Replaced: $g \in L^1(\nu)$	24
Replaced: $gf \in L^1(\mu)$	24
Commented: Tres cosas: 1)la medida μ no juega ni [...]	24
Added: no negativa	24
Commented: Me parece que no usas en ningun mo [...]	24
Replaced: STIELTJES	25
Commented: La demostración terminaría aca	25
Deleted: Si ψ es cualquier función integrable, [...]	25
Deleted: Luego, si se verifica para cualquier in [...]	25
Commented: Aca y en enunciados previos, sería bu [...]	25
Commented: No es una forma muy habitual de de [...]	27
Commented: Para mi tenes que poner todo lo que [...]	27

Comentarios gama de rojo

No escribiría $d(x'(t))$ porque reigurosamente hablando sería el diferencial de una constante, sería 0. Pondría simplemente dx' (fijate que en el miembro de la derecha no hay t , tampoco te hace falta a la izquierda	14
Pondría $0 = t_1$ y $t_n = T$ y debajo del supremo solo el símbolo de la partición P	18
No le pondría el ínfimo, es la definición de medida que ya diste. Por otro lado había que considerar uniones infinitas.	21
Calculo que lo que quieres decir es que para todo $[a_1, b_1) \subset [a, b]$ vale que $\mu_u([a_1, b_1)) = u(b_1) - u(a_1)$	22
Esta desigualdad se te invertiría si $a_i < 0$	25
No son necesarios los paréntesis	27

Capítulo 1

Introducción

El objetivo de esta tesis es encontrar soluciones periódicas a ecuaciones diferenciales con medidas o MDE, las cuales se pueden definir de manera general como

$$\begin{cases} d\varphi = F(t, \varphi(t)) d\mu \\ \varphi(0) - \varphi(T) = 0, \end{cases} \quad (MDE)$$

donde $F : [0, T] \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times m}$ es una función con valores matriciales, μ es una medida vectorial con valores en \mathbb{R}^m , $\varphi : [0, T] \rightarrow \mathbb{R}^n$ es una función de variación acotada y $d\varphi$ es la medida vectorial Lebesgue-Stieltjes asociada a φ .

Las MDE intervienen en modelos no suaves de varias ramas de la ciencia, como los modelos que describen el movimiento de moléculas en gases ideales hasta el análisis de la dinámica **de la pelota raqueta**. En física e ingeniería mecánica intervienen en el estudio de materia granular y **motores de arena**; en la robótica, se usan para estudiar impactos en las articulaciones (ver [7] y [17]). Un caso particular donde intervienen MDE es **aquel** dado por los modelos impulsivos, ver [4], [3] y [23]. Por ejemplo, en los sistemas mecánicos se puede pensar que el impacto entre dos cuerpos es un fenómeno de muy corta duración que implica un cambio brusco en la dinámica de los cuerpos. Es por eso que, **se suele representar a los impactos como fuerzas muy grandes que actúan en un tiempo infinitamente corto**. Supongamos que durante el impacto o colisión actúa una fuerza F y que este ocurre en un intervalo $[t_0, t_0 + \Delta t]$, entonces el cambio en la cantidad de movimiento es igual al impulso que genera la fuerza [21], o sea

$$I = \Delta p = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} F(s) ds.$$

Si suponemos que la fuerza actúa **en un intervalo muy chico, tanto que podemos decir que es instantánea**, entonces el impulso es

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} F(s) ds.$$

[2] Qué son los motores de arena?. Lo googlie y me parece que son como filtros de piletta. No los denominaremos de otra forma en argentina?

[1] No quedará mejor expresado si decimos “de los impactos de una pelota en una raqueta”?

[3] Para mi no iría

[4] Está en rojo

[5] Le buscaría un sinónimo a actúa, está muy repetido

Para que el impulso I sea distinto de cero, $F(\cdot)$ debe tomar valores **infinitos** ya que la medida de Lebesgue del intervalo tiende a cero. Por eso, es conveniente tomar a la fuerza como una medida de Dirac concentrada en el tiempo t_0 (la cual expresaremos como δ_{t_0}) y de magnitud I , es decir $F(t) = I\delta_{t_0}$. A este tipo de fuerza se la denomina fuerza impulsiva.

Otra fuente de problemas con medidas son los problemas de control. Podes agregar una breve mención sobre eso (podes sacar una idea del primer párrafo en el prefacio de [24]). También agregaría algo así: «Más allá de las aplicaciones, los problemas de ecuaciones diferenciales con medidas son, desde el punto de vista exclusivamente matemático, una generalización natural de las ecuaciones diferenciales ordinarias y a nuestro juicio este hecho ya justificaría su estudio. Varias teorías de integración han sido utilizadas para abordar problemas como los planteados en esta tesis, a saber integrales de Lebesgue-Stieltjes, Perron-Stieltjes, Kurzweil-Henstock (ver por ejemplo [20, 16, 19, 6]).»

Ejemplo 1. Supongamos que un cuerpo de masa m se mueve con velocidad constante sobre una recta, y se somete a impulsos I_k en los instantes t_k . Como el impulso es el cambio en la cantidad de movimiento ([21]), entonces $I_k = mv(t_k^+) - mv(t_k^-)$. Podemos decir que si el movimiento del cuerpo está dado por la función $x(t)$, entonces cumple la siguiente ecuación

$$\begin{cases} x''(t) = 0 & \text{si } t \neq t_k, \\ x'(t_k^+) - x'(t_k^-) = \frac{I_k}{m} & \text{para } k = 1, \dots, r. \end{cases} \quad (PI)$$

Si ahora consideramos la fuerza impulsiva $F(t) = \sum_{k=1}^r I_k \delta_{t_k}$, entonces podemos **puede** escribir el problema impulsivo PI como una MDE

$$d(x'(t)) = \sum_{k=1}^r \frac{I_k}{m} \delta_{t_k}.$$

Los modelos impulsivos intervienen en otras ciencias, además de física o matemática, como por ejemplo en biología.

Ejemplo 2. La ecuación

$$x' = rx \left(1 - \frac{x}{K}\right), \quad (1.0.1)$$

describe los cambios en el número de individuos $x(t)$ en una población aislada, de alguna especie biológica con una tasa de reproducción r , en un ambiente estacionario con una capacidad máxima de K . Para ser más precisos, supondremos que $x(t)$ es la cantidad de biomasa de una determinada especie de microorganismo cultivado en un biorreactor. Los efectos externos sobre el desarrollo de la especie pueden provocar saltos en la cantidad de biomasa $x(t)$. Esto es posible, por ejemplo, con una sola extracción de una parte de la biomasa o con la introducción de una cantidad adicional de biomasa. Los efectos externos en el momento $t = t_k$ generan que la cantidad de biomasa sufra un incremento, es decir

$$I_k = \Delta x(t_k) = x(t_k^+) - x(t_k^-).$$

[6] No lo diría así, en realidad hacer infinito a F tampoco arreglaría nada. ¿Qué te aparece decir lo siguiente? Si en la integral tuviesemos una función integrada respecto a la medida de lebesgue el límite sería cero por la absoluta continuidad de la integral. Por eso necesitamos integrar respecto a medidas que no sean absolutamente continuas respecto a la medida de lebesgue

No escribiría $d(x'(t))$ porque reiguerosamente hablando sería el diferencial de una constante, sería 0. Pondría simplemente dx' (fijate que en el miembro de la derecha no hay t , tampoco te hace falta a la izquierda

Como en el ejemplo anterior, este tipo de problemas puede ser descripto usando MDE. En este caso, tendríamos una parte de la ecuación no impulsiva o suave $f(t, x) = rx \left(1 - \frac{x}{K}\right)$, en donde actuaría la medida de Lebesgue (usaremos el símbolo $d\lambda$, para diferenciarla de otras medidas) y otra parte impulsiva o no suave donde estaría el impulso I_k con la medida de Dirac.

[7] ya está dicho

$$d(x) = rx \left(1 - \frac{x}{K}\right) d\lambda + g(x) d\delta_{t_k}.$$

Las ecuaciones impulsivas se pueden generalizar para casos donde actúan fuerzas no impulsivas $f(t, x)$ y/o donde se aplique una cantidad infinita de impulso. Un caso general se puede ver en [4], está dado por

$$\begin{cases} x'' = f(t, x(t)) & \text{si } t \neq t_k \\ x'(t_k^+) - x'(t_k^-) = I_k & \text{donde } k = 1, 2, \dots, \end{cases}$$

donde, como vimos en el ejemplo 1, se puede pensar a los impulsos como suma de deltas de Dirac concentradas en t_k y empleando la medida de Lebesgue $d\lambda$.

$$dx' = f(t, x(t))d\lambda + \sum_{k=1}^{\infty} I_k d\delta_{t_k}$$

Para resolver ecuaciones como (MDE), usaremos una metodología inspirada en la sección 1.3 del libro de Pablo Amster. Allí utiliza el método Shooting para hallar soluciones al problema de contorno periódico

$$\begin{cases} u' = f(t, u(t)) \\ u(0) - u(T) = 0, \end{cases}$$

donde f es una función continua y Lipschitz en la segunda variable $u \in \mathbb{R}^2$. La idea que propone Pablo Amster ~~consiste~~ ~~en~~ ~~consiste~~ en buscar una solución u_α al problema de valores iniciales

$$\begin{cases} u' &= f(t, u(t)) \\ u(0) &= \alpha, \end{cases}$$

y buscar un valor de $\alpha \in \mathbb{R}^2$ tal que $u_\alpha(T) = \alpha$. Es decir, u_α no es otra cosa que un punto fijo del operador de Poincaré $P : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, definido como $P(\alpha) = u_\alpha(T)$. Bajo ciertas condiciones, aplicando el Teorema de Brouwer [1] al operador podemos asegurar la existencia de la solución al problema periódico.

En el capítulo 2 haremos una breve introducción a la medida de Lebesgue-Stieltjes y sus propiedades. En el capítulo 3 se encuentran los resultados principales de este trabajo de tesis. En la sección 3.1 vamos a ver como transformar el problema (MDE) con medidas vectoriales a uno donde intervenga una sola medida positiva. En la sección 3.2 estableceremos las condiciones para la existencia de soluciones al problema de valores iniciales y su continuación a intervalos máximos. En la sección 3.3 enunciaremos y demostraremos una versión del teorema de Gronwall que hemos obtenido para medidas de Borel. A partir de este teorema, probaremos la continuidad del operador de Poincaré y finalmente podremos usar el Teorema Brouwer y hallar un punto fijo para el operador de Poincaré.

Capítulo 2

Medida de Lebesgue-Stieltjes

En este trabajo denotaremos por \mathbb{R} al conjunto de todos los números reales y por \mathbb{R}^n al conjunto de todas las n -uplas con componentes reales. Si $x \in \mathbb{R}^n$, escribiremos la norma euclídea como $|x| = \sqrt{x_1^2 + \cdots + x_n^2}$, y otra norma que usaremos será la del caminante $|x|_1 = |x_1| + \cdots + |x_n|$. El producto interno que usaremos es el usual en \mathbb{R}^n , definido por $x \cdot y = x_1y_1 + \cdots + x_ny_n$. Se puede pensar al vector x como una matriz de $n \times 1$, y notaremos con x^* a la matriz traspuesta $1 \times n$ de x .

El conjunto de todas las funciones continuas, $f : [0, T] \rightarrow \mathbb{R}^n$ será denotado como $C([0, T], \mathbb{R}^n)$ o simplemente $C([0, T])$ si su codominio es \mathbb{R} . Escribiremos $f'(x)$ para la derivada de funciones escalares como para funciones de \mathbb{R} a \mathbb{R}^n .

Sea \mathcal{X} un espacio topológico. Se define la σ -álgebra de Borel como a la σ -álgebra generada por los conjuntos abiertos de \mathcal{X} , y la denotaremos $\mathcal{B}(\mathcal{X})$. En particular, $\mathcal{B}(\mathbb{R})$ será la σ -álgebra generada por los intervalos abiertos de \mathbb{R} y $\mathcal{B}([a, b])$ la generada por los intervalos abiertos relativos de $[a, b]$. Diremos que una medida es de Borel si esta definida sobre la σ -álgebra de Borel. Dados dos conjuntos A y B , notaremos $A \setminus B$ al complemento de B respecto de A .

[8] Pondría en otro lado esta notación de diferencia de conjuntos

Después de haber avanzado en la lectura del capítulo me parece que va a quedar mejor si adoptas como criterio ir de lo más general a lo más particular. Por ejemplo, yo empezaría recordando la definición de medida vectorial y pondría las propiedades de la medidas vectoriales. Las funciones de variación acotada y la medida de Lebesgue-Stieltjes la dejaría más bien para el último, dado que son ejemplos más concretos de medidas. En el mismo sentido, noté que algunas cosas las decís para funciones no decrecientes y después las repetís para funciones de variación acotada. Te sugiero decirlo (si se puede) para funciones de variación acotada y después decir en el caso particular de que la función sea no decreciente que pasa.

2.1. Funciones de variación acotada

Cuando definimos *MDE* dijimos que φ era una función de variación acotada y que entendíamos a $d\varphi$ como la medida de Lebesgue-Stieltjes de φ . En esta sección daremos las definiciones y principales resultados, que nos permitan definir la medida de Lebesgue-Stieltjes de una función

de variación acotada.

[9] En esta y las definiciones de abajo, no vamos a necesitar funciones con valores a \mathbb{R}^n ?

Definición 2.1. Dada $u : [0, T] \rightarrow \mathbb{R}$, definimos la variación de u como

$$V(u, [0, T]) = \sup_{\substack{t_i \in [0, T] \\ 0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n \leq T}} \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} |u(t_{i+1}) - u(t_i)| \right\}$$

donde el supremo se toma sobre todas las particiones $P = \{t_1, \dots, t_n\}$ del intervalo $[0, T]$

Pondría $0 = t_1$ y $t_n = T$ y debajo del supremo solo el símbolo de la partición P

La variación nos permite introducir una clase de funciones y su correspondiente espacio.

Definición 2.2. Una función $u : [0, T] \rightarrow \mathbb{R}$ es de variación acotada en el intervalo $[0, T]$ si $V(u, [0, T]) < \infty$. El conjunto de todas las funciones de variación acotada en $[0, T]$ se denota como $BV([0, T], \mathbb{R})$. Si además $u(0) = \alpha$ diremos que $u \in BV_\alpha([0, T], \mathbb{R}^n)$.

El espacio de las funciones de variación acotada está incrustado dentro del espacio de las funciones acotadas.

Lema 2.3. $u \in BV_\alpha([0, T], \mathbb{R}^n)$, entonces para todo $t \in [0, T]$ existe $K > 0$ tal que $|u(t)| \leq K$.

Dem. Si $u \in BV_\alpha([0, T], \mathbb{R}^n)$, entonces

$$|u(t)| \leq |u(t) - u(0)| + |\alpha| \leq V(u, [0, t]) + |\alpha| \leq V(u, [0, T]) + |\alpha|. \quad (2.1.1)$$

Luego llamando $K = V(u, [0, T]) + |\alpha|$, tenemos que $|u(t)| \leq K$. \square

Podemos dotar a $BV_\alpha([0, T], \mathbb{R}^n)$ de una métrica.

Proposición 2.4. Si $d(u, v) = V(u - v, [0, T])$, entonces $(BV_\alpha([0, T], \mathbb{R}^n), d)$ es un espacio métrico completo.

Dem. Para que $(BV_\alpha([0, T], \mathbb{R}^n), d)$ sea un espacio métrico la función d tiene que ser una métrica. Sean $u, v, w \in BV_\alpha([0, T])$:

- Si $d(u, v) = 0$ entonces $V(u - v, [0, T]) = 0$, por lo tanto $v - u$ es constante y como $u(0) = v(0)$ resulta que $u = v$.

$$\text{■ } d(u, u) = V(u - u, [0, T]) = 0.$$

$$\text{■ } d(u, v) = V(u - v, [0, T]) > |u(0) - v(0) - u(T) + v(T)| > 0.$$

- Usando la definición de variación 2.1

$$\begin{aligned} d(u, v) &= \sup_{\substack{t_i \in [0, T] \\ 0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n \leq T}} \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} |u(t_{i+1}) - v(t_{i+1}) - u(t_i) + v(t_i)| \right\} \\ &= \sup_{\substack{t_i \in [0, T] \\ 0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n \leq T}} \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} |v(t_{i+1}) - u(t_{i+1}) - v(t_i) + u(t_i)| \right\} \\ &= d(v, u). \end{aligned}$$

[10] Me parece que este y el inciso que sigue son redundantes, porque el primero de todos era un si y solo si

- Sea $0 = t_1, t_2, \dots, t_k = T$ una partición del intervalo $[0, T]$, entonces

$$|u(t_{i+1}) - v(t_{i+1}) - u(t_i) + v(t_i)| \leq |u(t_{i+1}) - w(t_{i+1}) - u(t_i) + w(t_i)| + |w(t_{i+1}) - v(t_{i+1}) - w(t_i) + v(t_i)|,$$

sumando para $i = 1$ hasta $k - 1$ y tomando supremo sobre todas las particiones del intervalo $[0, T]$ tenemos que

$$V(u - v, [0, T]) \leq V(u - w, [0, T]) + V(w - v, [0, T]).$$

Por lo tanto $d(u, v) \leq d(u, w) + d(w, v)$.

Veamos que $(BV_\alpha([0, T], \mathbb{R}^n), d)$ es completo. Sea $\{u_n\}$ una sucesión de Cauchy. Como toda sucesión de Cauchy es acotada, luego existe una constante K tal que $\forall n \ d(u_n, 0) = V(u_n, [0, T]) \leq K$. Además por Lema 2.3 para cualquier $t \in [0, T]$

$$|u_n(t)| \leq |u_n(t) - u_n(0)| + |u_n(0)| \leq V(u_n, [0, T]) + |\alpha| \leq K. \quad (2.1.2)$$

Luego por el Primer Teorema de Helly (ver [18]) existe una subsucesión convergente. Una sucesión de Cauchy que posee una subsucesión convergente es, en si misma, convergente. Por lo tanto la sucesión es convergente. \square

[11] Va a quedar mejor si identificas con más precisión el teorema

El siguiente resultado permite caracterizar a las funciones de variación acotada.

Teorema 2.5 ([12, Teorema 3.27]). $u \in BV([0, T], \mathbb{R})$ si y sólo si u se puede escribir como la diferencia de dos funciones crecientes en $[0, T]$.

La demostración de este teorema y más información sobre funciones de variación acotada puede encontrarse en [8].

[12] Me parece que va a quedar mejor así, si en cada teorema pones la referencia de donde se puede ver

Corolario 2.6. Si $u \in BV([0, T], \mathbb{R})$, entonces

- para $0 < t < T$ los siguientes límites existen y son finitos

$$u(t^+) = \lim_{s \rightarrow t^+} u(s) \quad u(t^-) = \lim_{s \rightarrow t^-} u(s);$$

- $u(0^+)$ y $u(T^-)$ existen y son finitos.

2.2. Medida de Lebesgue-Stieltjes

A continuación, vamos a enumerar algunos resultados necesarios para definir la medida de Lebesgue-Stieltjes asociada a una función de variación acotada. Para un desarrollo mas detallado ver [12].

[13] Revisa por otros Stieljes

2.2.1. Medida de Lebesgue-Stieltjes en \mathbb{R}

Vamos a definir la medida de Lebesgue-Stieltjes para una función no decreciente y continua a izquierda. El mismo desarrollo se puede hacer para funciones no crecientes, con la salvedad de que la medida generada es negativa.

Vamos a recordar un procedimiento general para construir medidas que aplicaremos para definir la medida de Lebesgue-Stieltjes (ver [12] para más detalles)

[14] El creciente que debería sustituirse por no decreciente aparece un montón de veces, no te lo voy a corregir siempre

Definición 2.7. Sea \mathcal{A} un álgebra de subconjuntos de X , es decir \mathcal{A} es cerrado para uniones e intersecciones finitas y $\emptyset, X \in \mathcal{A}$. Diremos que la función $\mu_0 : \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty)$ es una premedida, si cumple

- $\mu_0(\emptyset) = 0$,
- si $\{A_i\}_1^\infty$ es una familia de conjuntos disjuntos tal que $\bigcup_1^\infty A_i \in \mathcal{A}$, entonces $\mu_0\left(\bigcup_1^\infty A_i\right) \leq \sum_1^\infty \mu_0(A_i)$.

[15] Aca traería la cuestión de la medida exterior, porque eso forma parte del método general, es decir con la definición que das extendes cualquier premedida

Vamos a denotar con \mathcal{A} a la colección de todos los conjuntos que se escriben como unión finita de intervalos disjuntos de la forma $[a, b)$ con $-\infty < a < b < \infty$, más el conjunto \emptyset . En proposición 1.2 y 1.7 de [12] se muestra que \mathcal{A} es un álgebra y que además genera la σ -álgebra de Borel.

Sea $u : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ creciente y continua a izquierda y sean $[a_j, b_j)$ intervalos disjuntos para $j = 1, \dots, m$. Por la proposición 1.15 de [12], la función μ_0 definida como

$$\mu_0\left(\bigcup_{j=1}^m [a_j, b_j)\right) = \sum_{j=1}^m (u(b_j) - u(a_j))$$

es una premedida en \mathcal{A} . A partir de una premedida podemos definir medida exterior para cualquier conjunto arbitrario $E \subset \mathbb{R}$ de la siguiente manera

$$\mu^*(E) = \inf \left\{ \sum_{j=1}^\infty \mu_0(A_j) \mid A_j \in \mathcal{A}, E \subset \bigcup_{j=1}^\infty A_j \right\}.$$

En $\mathcal{B}(\mathbb{R})$, μ^* satisface los axiomas de medida [12, Proposición 1.13].

[16] En lugar de creciente deberías decir no decreciente, fijate por otras veces que aparece

Definición 2.8. Si $u : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ es creciente y continua a izquierda, llamaremos medida de Lebesgue-Stieltjes μ_u a la medida inducida por μ_0 mediante el procedimiento anterior.

El siguiente teorema nos permite escribir cualquier medida finita sobre la σ -álgebra de Borel como una medida de Lebesgue-Stieltjes. La demostración es análoga a [12, Teorema 1.16].

Teorema 2.9. Si $u : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ es creciente y continua a izquierda, existe una única medida de Borel μ_u tal que $\mu_u([a, b)) = u(b) - u(a)$ para todo a, b . Si G es otra función creciente y continua a izquierda, entonces $\mu_u = \mu_G$ si y sólo si $u - G$ es constante. Recíprocamente, si μ es una medida de Borel en \mathbb{R} finita sobre cualquier conjunto acotado de Borel y se considera

$$F(x) = \begin{cases} \mu([0, x)) & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x = 0 \\ -\mu([0, -x)) & \text{si } x < 0. \end{cases}$$

Entonces F es creciente y continua izquierda, y $\mu = \mu_F$.

Observación 2.10.

- Si $u(x) = x$, entonces la medida μ_u no es otra que la medida de Lebesgue.
- Si u es continua en x , entonces usando [11, Teorema 3.28] tenemos que

$$\begin{aligned}\mu_u(\{x\}) &= \mu_u\left(\bigcap_{n=1}^{\infty} [x, x + 1/n)\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu_u([x, x + 1/n)) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(x + \frac{1}{n}\right) - u(x) = u(x) - u(x) = 0.\end{aligned}$$

- Si u es continua en b , entonces

$$\mu_u([a, b]) = \mu_u([a, b) \cup \{b\}) = \mu_u([a, b)) = u(b) - u(a).$$

2.2.2. Medida de Lebesgue-Stieltjes en un dominio acotado

Por la **Proposición 1.2** de [12], la familia de conjuntos $\mathcal{E} = \{(-\infty, x), \mid x \in \mathbb{R}\}$ genera la σ -álgebra de Borel. Llamaremos $\mathcal{B}([a, b])$ a la σ -álgebra de Borel restringida al intervalo $[a, b]$, la cual está generada por la familia de intervalos $\mathcal{E} \cap [a, b] = \{[a, x] \mid x \leq b\}$.

Sea $u : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ una función creciente y continua a izquierda, podemos extender su dominio a todos los números reales, de la siguiente forma:

$$\bar{u}(t) = \begin{cases} u(a) & \text{si } t < a \\ u(t) & \text{si } a \leq t < b \\ u(b) & \text{si } t \geq b. \end{cases}$$

Observación 2.11. La función \bar{u} tiene las siguientes propiedades:

- \bar{u} es creciente, continua a izquierda y en b es continua.
- La medida de Lebesgue-Stieltjes generada por \bar{u} cumple que

- I. $\mu_{\bar{u}}(\{b\}) = 0$,
- II. $\mu_{\bar{u}}([a, b]) = \mu_{\bar{u}}([a, b))$.

Definición 2.12. Sea $u : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ una función creciente y continua a izquierda. Para $A \subset [a, b]$ definimos la medida de Lebesgue-Stieltjes μ_u por

$$\mu_u(A) = \mu_{\bar{u}}(A) = \inf \left\{ \sum_{j=1}^n [\bar{u}(b_j) - \bar{u}(a_j)] \mid A \subset \bigcup_{j=1}^n [a_j, b_j) \right\}.$$

Observación 2.13.

- $\mu_u([a, b]) = \mu_{\bar{u}}([a, b]) = \bar{u}(b) - \bar{u}(a) = u(b) - u(a)$.
- Sea $[s, t) \subset [a, b]$ entonces

$$\mu_u([s, t)) = \mu_{\bar{u}}([s, t)) = \bar{u}(t) - \bar{u}(s) = u(t) - u(s).$$

- Sea $[s, t) \supset [a, b]$ entonces

$$\mu_u([s, t)) = \mu_{\bar{u}}([s, t)) = \bar{u}(t) - \bar{u}(s) = u(b) - u(a).$$

[17] Al principio de todo habías definido la σ -álgebra de Borel, no es necesario que la vuelvas a definir. La σ -álgebra de Borel es la que generan los abiertos, en este caso los abiertos del $[0, T]$.

[18] Estas observaciones las citas después?

No le pondría el ínfimo, es la definición de medida que ya diste. Por otro lado había que considerar uniones infinitas.

[19] Lo que viene, no sería más apropiado ponerlo en la sección siguiente?

Si en la definición 2.7 tomamos a la función $\mu_0 : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$, entonces la medida generada se llama medida con signo. Veamos que para $f \in BV([a, b], \mathbb{R}^n)$ la medida asociada a f , es una medida con signo.

Si en la definición 2.7 asumimos que μ_0 toma valores en \mathbb{R} , en lugar de los reales no negativos, llamaremos a μ_0 una *premedida con signo*. Ahora podemos asociar una medida con signo a μ_0 por el mismo procedimiento que usamos para premedidas (no negativas).

[20] Sería más enfático sobre, estuve rato para darme cuenta lo que querías decir. Te lo escribo en verde

Teorema 2.14. Sea $u \in BV([a, b], \mathbb{R})$ y continua a izquierda. Existe una medida de Borel con signo μ_u , tal que

$$\mu_u([a, b]) = u(b) - u(a).$$

Para cualquier función f μ_u -integrable y cualquier conjunto de Borel A , notaremos

$$\int_A f(s) d\mu_u(s) = \int_A f(s) du(s).$$

Calculo que lo que quieres decir es que para todo $[a_1, b_1] \subset [a, b]$ vale que $\mu_u([a_1, b_1]) = u(b_1) - u(a_1)$.

Dem. Por el teorema 2.5, si $u \in BV([a, b], \mathbb{R})$ y es continua a izquierda, entonces existen u_1 y u_2 funciones crecientes y continuas a izquierda tal que $u = u_1 - u_2$. Luego, por el teorema 2.9, las medidas generadas por u_1 y u_2 son medidas de Borel. Ahora si llamamos $\mu_u = \mu_{u_1} - \mu_{u_2}$, entonces

$$\mu_u([a, b]) = u(b) - u(a).$$

□

2.3. Medida de Lebesgue-Stieltjes con signo

Las siguientes definiciones y resultados están basados en [12, Capítulo 3].

Definición 2.15. Diremos que la medida con signo ν es absolutamente continua respecto de la medida con signo μ , y notaremos $\nu \ll \mu$, si $\nu(A) = 0$ cada vez que $\mu(A) = 0$.

[21] El título dice medidas de Lebesgue-Stieltjes, sin embargo la sección no se refiere a esas medidas parti-

Esto te lo comento más en general, me refiero para toda la tesis, busca agregar un poco de texto para elazar los resultados. sino fijate por ejemplo aca tenes como cuatro definiciones y un teorema uno detras de otro. Por ejemplo en este punto podrías decir «El siguiente concepto es en cierto sentido el opuesto del de la definición anterior.»

[22] Me parece que o bien μ es medida (sin signo), o pones $|\mu|(A) = 0$

Definición 2.16. Diremos que dos medidas con signo μ y η son mutuamente singulares, y notaremos $\mu \perp \eta$, si existen conjuntos $E, F \in \mathcal{B}([0, T])$ disjuntos tal que $E \cup F = [0, T]$, $\mu(E) = 0$ y $\eta(F) = 0$.

Aca podrías decir «Para aquel acostumbrado a trabajar con la medida de Lebesgue, le será natural que los conjuntos unitarios tienen medida cero. Sin embargo, hay que tener presente que este no es el caso para una medida de Borel en general. Vamos introducir una definición relativa a este punto.»

[23] Aca también hay que o decir que son medidas o que son las variaciones las que cumplen eso por que si no aparecen otras cosas

[24] Pasaría esta definición y la observación junto a la Definición 2.28, más aún podrías agregarlo dentro de aquella, como que tuviera dos partes, la primera esta y la segunda la que va

[25] No se porque definis esto aquí, me parece que no lo vuelves a mencionar en este capítulo. Si lo necesitas lo

[26] No es común ni frecuente en la literatura enfatizar poniendo mayúsculas o small caps como usas aquí. Latex tiene un comando específico “emph” para enfatizar

[28] la primera y la última son bastante inmediatas, a la segunda y tercera le buscaría referencias

Definición 2.17. Diremos que una medida con signo μ es continua si para todo $t \in I$ $\mu(\{t\}) = 0$

Observación 2.18. Sea h una función continua. Entonces la medida con signo μ_h es continua. Pues $\forall t \in [0, T]$

$$\begin{aligned}\mu_h(\{t\}) &= \mu_h \left(\bigcap_{n=1}^{\infty} [t, t + 1/n) \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu_h([t, t + 1/n)) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} h(t + 1/n) - h(t) = h(t^+) - h(t) = 0.\end{aligned}$$

Definición 2.19. Diremos que un conjunto A está compactamente incluido en el conjunto B , si y sólo si \bar{A} es compacto y $\bar{A} \subset B^\circ$. Lo notaremos como $A \Subset B$.

Teorema 2.20. Sea μ una medida con signo, entonces existen μ^- y μ^+ medidas positivas tal que $\mu = \mu^+ - \mu^-$, y además $\mu^+ \perp \mu^-$.

El teorema anterior se denomina DESCOMPOSICIÓN DE JORDAN ver [12, Capitulo 3.1], y a las medidas μ^+ y μ^- se las llama variación positiva y negativa de μ , respectivamente.

Definición 2.21. Sea μ una medida con signo. Definimos la variación total de μ , como

$$|\mu| = \mu^+ + \mu^-.$$

Observación 2.22. Sea μ una medida con signo, entonces valen las siguientes propiedades:

- $|\mu|$ es una medida de Borel positiva.
- Para cualquier conjunto E μ -medible, se verifica

$$|\mu|(E) = \sup \left\{ \sum_{i=1}^n |\mu(E_i)| \text{ donde } \bigcup_{i=1}^n E_i = E, E_i \text{ disjuntos} \right\}. \quad (2.3.1)$$

- Para cualquier función $f \in L^1(\mu)$ y E un conjunto μ -medible, vale que

$$\left| \int_E f \, d\mu \right| \leq \int_E |f| \, d|\mu|.$$

- $\mu^\pm \ll |\mu|$.

Recordemos a los bien conocidos espacios L^p .

Definición 2.23. Sean μ una medida de Borel positiva y $u : [0, T] \rightarrow \mathbb{R}^n$ una función μ -medible. Diremos que:

- a) $u \in L^p([0, T], \mu)$ con $1 \leq p < \infty$ si

$$\|u\|_{L^p(\mu)} = \left[\int_{[0, T]} |u(t)|^p d\mu \right]^{1/p} < \infty.$$

En caso de que el dominio de u esté ~~sobrentendido~~~~sobreentendido~~ notaremos $u \in L^p(\mu)$ y cuando μ sea la medida de Lebesgue se ~~denotará~~~~denotara~~ simplemente $L^p([0, T])$.

[27] Enfatiza los conceptos que definis. En el glosario ingresa el concepto de variación y lo de positiva y negativa como subconceptos

b) Sea μ una medida de Borel positiva. Diremos que $u \in L^\infty([0, T], \mu)$ si

$$\|u\|_{L^\infty(\mu)} = \inf\{M \mid |u(t)| < M, \text{ para } \mu\text{-c.t.p.}\} < \infty.$$

Definición 2.24. Sea μ una medida de Borel con signo, entonces definimos $L^p(\mu) = L^p(|\mu|)$.

Dadas dos medidas, el siguiente célebre teorema nos muestra como podemos descomponer una de ellas en suma de dos medidas una absolutamente continua y otra mutuamente singular respecto a la segunda. Además nos permite relacionar integrales entre medidas distintas.

Teorema 2.25 (Radon-Nikodym-Nikodym). Sea ρ una medida finita con signo y μ una medida positiva finita en el espacio $([0, T], \mathcal{B}([0, T]))$. Entonces existen λ y ν medidas finitas con signo tal que

$$\lambda \perp \mu, \quad \nu \ll \mu \quad \text{y} \quad \rho = \lambda + \nu.$$

Más aún, existe una función $h : [0, T] \rightarrow \mathbb{R}$ μ -integrable tal que para todo $A \in \mathcal{B}([0, T])$

$$\nu(A) = \int_A h(s) d\mu(s).$$

A la función h se la suele llamar la derivada de Radon-Nikodym de ν respecto a la medida μ , y se denota $\frac{d\nu}{d\mu}$. La siguiente proposición es consecuencia del Teorema 2.25 y está demostrada en [12, Proposición 3.9].

Proposición 2.26. Sean μ una medida de Borel con signo y finita, y $f \in L^1(|\mu|)$. Si definimos

$$\nu(A) = \int_A f d\mu,$$

entonces ν es una medida con signo absolutamente continua respecto a $|\mu|$ y para toda función $g \in L^1(|\nu|)$ vale que $gf \in L^1(|\mu|)$ y

$$\int_A g(s) d\nu = \int_A g(s)f(s) d\mu.$$

El siguiente resultado lo necesitaremos usar más adelante. Si bien es elemental, no encontramos referencias para el mismo. Por este motivo incluimos una breve demostración.

Lema 2.27. Supongamos que $\nu \ll \mu$ y sea μ^* una medida tal que $\nu(A) \leq \mu^*(A)$, entonces para toda función no negativa $\psi \in L^1(\nu)$ vale que

$$\int_A \psi(r) d\nu(r) \leq \int_A \psi(r) d\mu^*.$$

Dem. Vamos a tomar el conjunto A como un intervalo abierto I .

- Si ψ es una función característica, es decir, $\psi(t) = X_E(t)$. Tenemos

$$\begin{aligned} \int_I \psi(r) d\nu(r) &= \int_{I \cap E} d\nu(r) = \nu(I \cap E) \leq \mu^*(I \cap E) \\ &\leq \int_{I \cap E} d\mu^*(r) = \int_I \psi(r) d\mu^*(r). \end{aligned}$$

[29] Que μ era una medida de Borel positiva estaba puesto como hipótesis general al comienzo

[30] Para mi esta definición no hace falta, llegado el momento se habla de $L^p(|\mu|)$ en lugar de $L^p(\mu)$.

[31] Hay que revisar la definición, pero en general las medidas con signo son siempre finitas, porque con estas medidas de admitir valores infinitos puede presentarse la indeterminación $\infty - \infty$, que con las medidas positivas no pasa

[32] punto y aparte

[34] Me parece que no usas en ningún momento que I sea un intervalo, con la misma demostración te sale para cualquier A

[33] Tres cosas: 1) la medida μ no juega ningún rol en el teorema ni en su demostración. Para mi podrías sacarla y llamar μ a μ^* 2) que tipo de medidas son ν y μ^* ? 3) El resultado, como está escrito, no vale. Sale si $\psi \geq 0$ Fijate que en la demostración si uno de los a_i fuera negativo una desigualdad se te invertiría

- Si ψ es una función simple, dada por $\psi(t) = \sum_{i=1}^m a_i X_{E_i}(t)$, $a_i \geq 0$, entonces

$$\begin{aligned} \int_I \psi(r) d\nu(r) &= \sum_{i=1}^m \left(a_i \int_I X_{E_i}(r) d\nu(r) \right) \\ &\leq \sum_{i=1}^m a_i \left(\int_I X_{E_i}(r) d\mu^*(r) \right) = \int_I \psi(r) d\mu^*(r). \end{aligned}$$

Esta desigualdad se te invertiría si $a_i < 0$

- Si ψ es una función integrable positiva, entonces existe una sucesión de funciones simples $f_1(t) \leq f_2(t) \leq \dots$ tal que $\lim_{k \rightarrow \infty} f_k(t) = \psi(t)$. Luego, usando el Teorema de Beppo-Levi [11, Teorema 5.6],

$$\begin{aligned} \int_I \psi(r) d\nu(r) &= \lim_{k \rightarrow \infty} \int_I f_k(r) d\nu(r) \\ &\leq \lim_{k \rightarrow \infty} \int_I f_k(r) d\mu^*(r) = \int_I \psi(r) d\mu^*(r). \end{aligned}$$

[35] La demostración terminaría acá

- Si ψ es cualquier función integrable, entonces se puede descomponer como diferencia de dos funciones positivas, es decir $\psi = \psi^+ - \psi^-$ y por el ítem anterior satisface que

$$\int_I \psi(r) d\nu(r) \leq \int_I \psi(r) d\mu^*.$$

Luego, si se verifica para cualquier intervalo abierto I entonces, como este tipo de conjuntos generan la σ -álgebra de Borel, se satisface para cualquier conjunto boreliano A .

□

Como veremos más adelante el conjunto de puntos donde una medida es discontinua jugará un rol importante en la Teoría de Integración.

[36] Aca y en enunciados previos, sería bueno que aclares donde estan definidas estas medidas

Definición 2.28. Sea μ una medida con signo. Llamaremos D_μ o simplemente D , al conjunto de los puntos de discontinuidad de μ , es decir,

$$D = \{t \in [0, T] \mid \mu(\{t\}) \neq 0\}.$$

Lema 2.29. Si $\mu : \mathcal{B}([0, T]) \rightarrow \mathbb{R}$ es una medida finita y positiva, entonces el conjunto D es numerable.

Dem. Para $n \in \mathbb{N}$ definimos el conjunto $D_n = \{\tau \mid \mu(\{\tau\}) > 1/n\}$, entonces $D = \bigcup_{n=1}^{\infty} D_n$. Cada conjunto D_n es finito, porque de lo contrario va a existir una sucesión de elementos $\{a_k\}_{k=1}^{\infty} \subset D_n$ tal que

$$\mu([0, T]) \geq \mu(D_n) \geq \sum_{k=1}^{\infty} \mu(\{a_k\}) > \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{n} = \infty,$$

lo cual es un absurdo, pues μ es una medida finita. Por lo tanto, como D_n es finito entonces D es la unión numerable de conjuntos finitos. □

Capítulo 3

Soluciones periódicas a MDE

3.1. Ecuaciones diferenciales con medidas vectoriales

Los problemas impulsivos pueden pensarse como problemas donde intervienen medidas. En el ejemplo 1 del capítulo 1, al problema impulsivo (PI) lo escribimos como una MDE de la siguiente manera

No son necesarios los paréntesis

$$d(x') = \sum_{k=1}^r \frac{I_k}{m} \delta_{t_k}.$$

[37] No es una forma muy habitual de denotar un sistema, tengo miedo que no se entienda, te sugiero lo verde (use el paquete empheq que es bastante cómodo)

Si realizamos la sustitución $v = x'$ tendremos el sistema

$$\begin{cases} x' = v d\lambda, \\ v' = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^r I_k \delta_{t_k}. \end{cases} \quad (3.1.1)$$

$$(3.1.2)$$

$$(x', v') = \left(v, \frac{1}{m} \right) \cdot \left(d\lambda, \sum_{k=1}^r I_k \delta_{t_k} \right),$$

donde el término de la derecha del producto escalar es una medida vectorial. En [9] se define medida vectorial para espacios de Banach X **y?...no sé si este comentario es conveniente aquí....** Cuando X es un espacio euclídeo m -dimensional, una medida vectorial se puede pensar como un vector de medidas, es decir $\nu = (\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m)$ donde cada ν_i es una medida de Borel con signo. La variación total de una medida vectorial ν se define para un conjunto de Borel E , (ver definición 4 de [9], tomando \mathbb{R}^m con la norma de l^1) como

$$\|\nu\|(E) = \sup \left\{ \sum_{j=1}^r |\nu(E_j)|_1 \text{ donde } \bigcup_{j=1}^r E_j = E \right\},$$

teniendo en cuenta que $|\nu(E_j)|_1 = \sum_{i=1}^m |\nu_i(E_j)|$.

En esta sección mostraremos que las soluciones a ecuaciones diferenciales donde intervienen medidas vectoriales son también soluciones a ecuaciones donde interviene una medida de Borel positiva.

[38] Para mi tenes que poner todo lo que tenes sobre medidas vectoriales en la sección siguiente y pasarla al capítulo anterior que debería ser de todos los pre-requisitos. Empezaría recordando la definición del concepto de meddia vectorial, porque es algo que no se si todos conocen. Es menos familiar que el concepto de variación acotada

3.1.1. Medidas vectoriales

El siguiente resultado nos permite expresar la variación total de una medida vectorial de una manera simple.

Lema 3.1. Sea $\nu = (\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m)$ una medida vectorial, entonces

$$||\nu||(E) = \sum_{i=1}^m |\nu_i|(E), \quad (3.1.3)$$

para cualquier conjunto de Borel E .

Dem. Por (2.22) y como $|\nu(E)|_1 = \sum_{i=1}^m |\nu_i(E)|$, tenemos

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m |\nu_i|(E) &= \sum_{i=1}^m \left[\sup \left\{ \sum_{j=1}^r |\nu_i(E_j)| \mid \bigcup_{j=1}^r E_j = E \right\} \right] \\ &\sum_{i=1}^m |\nu_i|(E) \geq \sup \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^r |\nu_i(E_j)| \mid \bigcup_{j=1}^r E_j = E \right\} \\ &\sum_{i=1}^m |\nu_i|(E) \geq \sup \left\{ \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^m |\nu_i(E_j)| \mid \bigcup_{j=1}^r E_j = E \right\} \\ &\sum_{i=1}^m |\nu_i|(E) \geq ||\nu||(E). \end{aligned}$$

En la frase que sigue se mezcla la descomposición con las componentes (o como se llamen...) de la descomposición.

Sea E_i^+ y E_i^- la descomposición de Hahn del conjunto E respecto de la medida ν_i (ver [12]), entonces

$$|\nu_i|(E) = \nu_i(E_i^+) - \nu_i(E_i^-). \quad (3.1.4)$$

Sea $I = \{\alpha \in \mathbb{R}^m, \mid \alpha_i \in \{+, -\}\}$ y para cada $\alpha \in I$ definimos $F_\alpha = \bigcap_{i=1}^m E_i^{\alpha_i}$.

AFIRMACIÓN 1: $\{F_\alpha\}_{\alpha \in I}$ es una familia de conjuntos mutuamente disjuntos. Ya que, si $\alpha \neq \beta$, existe i tal que $\alpha_i \neq \beta_i$ y por lo tanto $E_i^{\alpha_i} \cap E_i^{\beta_i} = \emptyset$. Luego

$$F_\alpha \cap F_\beta = \bigcap_{i=1}^m E_i^{\alpha_i} \cap \bigcap_{i=1}^m E_i^{\beta_i} = \bigcap_{i=1}^m E_i^{\alpha_i} \cap E_i^{\beta_i} = \emptyset.$$

AFIRMACIÓN 2: Para $i = 1, \dots, m$

$$|\nu_i|(E) = \sum_{\substack{\alpha \in I \\ \alpha_i = +}} \nu_i(F_\alpha) - \sum_{\substack{\alpha \in I \\ \alpha_i = -}} \nu_i(F_\alpha). \quad (3.1.5)$$

Si $\alpha_i \neq \beta_i$ vale que $E_i^{\alpha_i} \cup E_i^{\beta_i} = E$. Entonces

$$\begin{aligned} \bigcup_{\substack{\alpha \in I \\ \alpha_i = +}} F_\alpha &= \bigcup_{\substack{\alpha \in I \\ \alpha_i = +}} (E_1^{\alpha_1} \cap \dots \cap E_i^+ \cap \dots \cap E_m^{\alpha_m}) \\ &= E_i^+ \cap \left(\bigcup_{j=1}^m E_j^+ \cup E_j^- \right) = E_i^+ \cap E = E_i^+, \end{aligned}$$

y de igual manera

$$\bigcup_{\substack{\alpha \in I \\ \alpha_i = -}} F_\alpha = E_i^- \cap E = E_i^-.$$

Ahora reemplazamos en (3.1.4), tenemos que

$$|\nu_i|(E) = \nu_i \left(\bigcup_{\substack{\alpha \in I \\ \alpha_i = +}} F_\alpha \right) + \nu_i \left(\bigcup_{\substack{\alpha \in I \\ \alpha_i = -}} F_\alpha \right) = \sum_{\substack{\alpha \in I \\ \alpha_i = +}} \nu_i(F_\alpha) - \sum_{\substack{\alpha \in I \\ \alpha_i = -}} \nu_i(F_\alpha).$$

Como $F_\alpha \subset E_i^{\alpha_i}$ tenemos que, si $\alpha_i = +$ entonces $\nu_i(F_\alpha) > 0$, y si $\alpha_i = -$ entonces $\nu_i(F_\alpha) < 0$. Luego de (3.1.5)

$$|\nu_i|(E) = \sum_{\substack{\alpha \in I \\ \alpha_i = +}} |\nu_i(F_\alpha)| + \sum_{\substack{\alpha \in I \\ \alpha_i = -}} |\nu_i(F_\alpha)| = \sum_{\alpha \in I} |\nu_i(F_\alpha)|,$$

y sumando la variación total de cada medida ν_i ,

$$\sum_{i=1}^m |\nu_i|(E) = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{\alpha \in I} |\nu_i(F_\alpha)| \right) = \sum_{\alpha \in I} \sum_{i=1}^m |\nu_i(F_\alpha)|.$$

Por lo tanto

$$\sum_{i=1}^m |\nu_i|(E) = \sum_{\alpha \in I} |\nu(F_\alpha)| \leq \|\nu\|(E).$$

□

Observación 3.2. Por (2.22), $\nu_i \ll |\nu_i|$ y por el lema 3.1 cada $|\nu_i|$ es absolutamente continua respecto a la medida $\|\nu\|$. Entonces para toda $i = 1, \dots, m$ vale que $\nu_i \ll \|\nu\|$. Por el teorema Radon-Nikodym (2.25), existe $h_i \in L^1(\|\nu\|)$ tal que para todo conjunto de Borel A se puede escribir

$$\nu_i(A) = \int_A h_i(s) d\|\nu\|.$$

Proposición 3.3. Sea ν una medida vectorial, entonces existe $H \in L^1(\mathbb{R}^m, \|\nu\|)$ tal que para todo conjunto de Borel A ,

$$\nu(A) = \int_A H(s) d\|\nu\|.$$

Dem. El resultado se obtiene por aplicación de la Observación (3.2). □

3.1.2. Soluciones a ecuaciones con medidas vectoriales

Sea $F : [0, T] \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times m}$ con $F(t, x)$ suficientemente buena o continua y localmente Lipschitz con respecto a x , y ν una medida vectorial con valores en \mathbb{R}^m . Vamos a considerar la ecuación

$$d\varphi(t) = F(t, \varphi(t))d\nu. \quad (3.1.6)$$

Definición 3.4. Una solución de (3.1.6) es una función $\varphi \in BV([0, T], \mathbb{R}^n)$ y continua a izquierda, tal que

$$\int_{[0, t)} d\varphi = \varphi(t) - \varphi(0) = \int_{[0, t)} F(s, \varphi(s)) d\nu. \quad (3.1.7)$$

Teorema 3.5. *Una solución de (3.1.6) es también solución de*

$$d\varphi = f(t, \varphi(t))d\mu, \quad (3.1.8)$$

donde $f = F[H]^* : [0, T] \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ y μ es una medida de Borel positiva.

Dem. De la proposición (3.3) se tiene que existe $H : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ en $L^1(\|\nu\|)$ tal que podemos escribir la definición (3.1.7) como

$$\varphi(t) - \varphi(0) = \int_{[0,t)} F(s, \varphi(s)) d\nu = \int_{[0,t)} F(s, \varphi(s)) [H(s)]^\tau d\|\nu\|.$$

De esta manera, podemos decir que la solución de (3.1.6), es también solución de un problema donde la medida que interviene no es vectorial. En efecto, si llamamos $f(t, x) = F(t, x)[H(t)]^\tau$ y $\mu = \|\nu\|$ tenemos

$$d\varphi = f(t, \varphi(t))d\mu,$$

donde $f : [0, T] \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ y μ es una medida de Borel positiva. \square

En el siguiente ejemplo mostramos cómo una solución a problemas impulsivos del estilo de 1 y 2, son soluciones a MDE para una medida de Borel positiva.

Ejemplo 1. Sea $\varphi : [0, T] \rightarrow \mathbb{R}$ solución de la ecuación impulsiva

$$d\varphi = F(t, \varphi) + \sum_{k=1}^r g_k(t) d\delta_{t_k}, \quad (3.1.9)$$

donde $g_i : [0, T] \rightarrow \mathbb{R}$ y F son funciones continuas. Cuando F no esté acompañada de ninguna medida vamos a convenir que se trata de la medida de Lebesgue $d\lambda$. A la expresión anterior podemos escribirla de manera vectorial como

$$d\varphi = (F(t, \varphi(t)), g_1(t), \dots, g_r(t)) (d\lambda, d\delta_{t_1}, \dots, d\delta_{t_r})^\tau.$$

Si llamamos $\nu = (\lambda, \delta_{t_1}, \dots, \delta_{t_r})$ y aplicamos el teorema (3.5) tenemos que $\|\nu\| = \lambda + \sum_{k=1}^r \delta_{t_k}$. Como

$$\delta_{t_k}(A) = \int_A \chi_{\{t_k\}} d\|\nu\|$$

y

$$\lambda(A) = \int_A \chi_{A - \{t_1, \dots, t_r\}} d\|\nu\|,$$

entonces, notando $H(t) = (1, \chi_{\{t_1\}}, \dots, \chi_{\{t_r\}})$ la solución de (3.1.9) es también solución de la ecuación

$$d\varphi = (F(t, x), g_1(t), \dots, g_r(t)) H(t)^\tau d\|\nu\|.$$

Si escribimos $f(t, x) = (F(t, x), g_1(t), \dots, g_r(t))H(t)^\tau$ y $\|\nu\| = \mu$ entonces φ es solución de (3.1.8).

En la definición 3.4, dijimos que una solución de la MDE

$$d\varphi = f(t, \varphi(t))d\mu,$$

es una función $\varphi \in BV([0, T], \mathbb{R}^n)$ y continua a izquierda, que cumple con la ecuación integral (3.1.7). Sin embargo, no es la única [forma de definir solución](#) solución que podemos obtener para esta ecuación. Dependiendo de a qué consideramos solución, ésta puede variar. Si en la construcción de la medida de Lebesgue-Stieltjes (hecha en el capítulo 2) tomamos funciones continuas a derecha, entonces la solución a (3.1.8) será distinta. Por ejemplo, consideremos el siguiente problema de valores iniciales

$$\begin{cases} dx = -ax(t) d\delta_1 & t \in [0, 2] \\ x(0) = x_0, \end{cases} \quad (3.1.10)$$

donde δ_1 es la medida delta de Dirac concentrada en 1. La solución continua a izquierda es

$$x(t) = \begin{cases} x_0 & \text{si } t \in [0, 1] \\ 0 & \text{si } t \in (1, 2]. \end{cases}$$

En cambio, la solución continua a derecha es

$$x(t) = \begin{cases} x_0 & \text{si } t \in [0, 1) \\ \frac{x_0}{2} & \text{si } t \in [1, 2]. \end{cases}$$

Otras definiciones de solución para la ecuación (3.1.8) pueden encontrarse en el marco de la teoría de distribuciones ([pongo referencia??](#)), y como límite puntual de una sucesión de soluciones a ecuaciones sin medida. Es decir, una sucesión φ_k de soluciones a la ecuación

$$d\varphi_k = f(t, \varphi_k(t))v_k(t), \quad (3.1.11)$$

donde v_k son continuas y $v'_k \rightarrow \frac{d\mu}{d\lambda}$. Veamos este tipo de solución para el ejemplo (3.1.10). La sucesión de funciones

$$h_k(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t \in [0, 1 - 1/k] \\ k(t - 1) + 1 & \text{si } t \in (1 - 1/k, 1) \\ 1 & \text{si } t \in [1, 2], \end{cases}$$

son continuas y convergen a la función de Heaviside H_1 , cuya derivada es δ_1 . Luego la solución a

$$\begin{cases} dx = -ax(t)h_k(t) & t \in [0, 2] \\ x(0) = x_0, \end{cases} \quad (3.1.12)$$

es $x_k(t) = x_0 \exp\left(-\int_0^t h_k(t)dt\right)$. Cuando $k \rightarrow \infty$, x_k tiende a

$$x(t) = \begin{cases} x_0 & \text{si } t \in [0, 1) \\ x_0 e^{1-t} & \text{si } t \in [1, 2], \end{cases}$$

que es la solución a (3.1.10). Como vemos podemos tener distintas soluciones para la misma ecuación, dependiendo de qué entendamos como solución. Este fenómeno se conoce como la paradoja de MDE.

3.2. Existencia de Soluciones a MDE

En esta sección vamos a presentar algunos resultados, probados en [5], sobre existencia de soluciones locales.

En algunos trabajos se escribe algo del estilo: “Con el objeto/objetivo de hacer este trabajo autocontenido, en esta sección vamos a presentar algunos resultados...”

Al final, demostraremos un teorema de cambio de variables para integrales de Lebesgue-Stieltjes (L-S).

3.2.1. Soluciones locales

Vamos a considerar el problema de valores iniciales con medida (MDE)

$$\begin{cases} d(\varphi) = f(t, \varphi(t)) d\mu \\ \varphi(0) = x_0, \end{cases} \quad (P)$$

donde $f : \Omega \subset [0, T] \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, μ es una medida de Borel finita y $d\varphi$ es la medida de Lebesgue-Stieltjes generada por φ . En adelante, cuando hablemos de medidas de Borel, estaremos refiriéndonos a medidas positivas. En cualquier otro caso, lo aclararemos.

Definición 3.6. Sea $t_0 \in [0, T]$, $h > 0$, $x_0 \in \mathbb{R}^n$ y $r > 0$, diremos que $f : \Omega = [t_0, t_0 + h] \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ es localmente Lipschitz si existe $L > 0$ tal que

$$\|f(t, x) - f(t, y)\| \leq L \|x - y\| \quad (3.2.1)$$

para todo $(t, x, y) \in I \times \overline{B(x_0, r)} \times \overline{B(x_0, r)}$.

La primera oración de la siguiente definición está confusa o desordenada en la presentación de los elementos.

Definición 3.7 (Solución del problema (P)). Sea $I = [t_0, t_0 + h] \subset \mathbb{R}$, $\mu : I \rightarrow \mathbb{R}^m$ una medida vectorial de Borel, $x_0 \in \mathbb{R}^n$ y $\Omega \subset I \times \mathbb{R}^n$ un entorno abierto de (t_0, x_0) . Si supongamos que $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^{n \times m}$ cumple con

- (I) Para cada $x \in \mathbb{R}^n$, $f(t, x)$ es μ -medible respecto a la variable t .
- (II) Para cada t , $f(t, x)$ es continua con respecto a la variable x .
- (III) Existe $\alpha : \mathbb{R}^n \rightarrow [0, \infty)$ continua y $\beta \in L^1(\mathbb{R}, |\mu|)$ no negativa tal que

$$\|f(t, x)\| \leq \beta(t) \alpha(x).$$

Entonces el par (φ, I) es solución de (P), si para todo $t \in I$, se verifica que $(t, \varphi(t)) \in \Omega$, $\varphi \in BV(I, \mathbb{R}^n)$ y continua a izquierda en I ; y además para todo conjunto de Borel A vale que

$$\mu_\varphi(A) = \int_A f(t, \varphi(t)) d\mu.$$

Teorema 3.8 (Picard–Lindelöf). Supongamos que f está acotada (es decir $\|f\|_\infty \leq M$), y satisface las condiciones (I) y (II) y (3.2.1). Asumimos que μ es una medida de Borel definida en I y existe $\delta_1 > 0$ tal que $|\mu|([t_0, t_0 + \delta_1]) \leq r/M$. Si $\delta = \min\{\delta_1, h\}$, el problema (P) tiene una única solución en el intervalo $[t_0, t_0 + \delta]$.

La demostración del teorema está en [5, Teorema 4.1]

3.2.2. Extensión de las soluciones

Definición 3.9 (Solución Máxima). Sean $\Omega \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$ un conjunto abierto, $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$, $(t_0, x_0) \in \Omega$ y μ una medida de Borel finita. Si φ es solución del problema (P) en el intervalo $I = [t_0, t_0 + \delta)$, diremos que (φ, I) es la solución máxima si no hay otra solución (ψ, J) tal que $I \subset J$ y para todo $t \in I$ $\varphi(t) = \psi(t)$.

Definición 3.10. Sean μ una medida de Borel finita y $f : [0, T] \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$. Diremos que f cumple con la **condiciones de teletransportación** en $\overline{B(0, R)}$, si para todo $t \in [0, T]$ tal que $\mu(\{t\}) \neq 0$ y $x \in \overline{B(0, R)}$ vale que

$$x + f(t, x)\mu(\{t\}) \in \overline{B(0, R)},$$

donde $B(0, R)$ denota la bola abierta de \mathbb{R}^n de radio R y centrada en el origen.

Teorema 3.11. Sean μ una medida de Borel finita, f localmente Lipschitz respecto a la variable vectorial y φ solución máxima de (P) en $I = [t_0, t_1)$. Entonces una y sólo una de las siguientes afirmaciones es verdadera:

(I) Para todo $K \subseteq \Omega$ existe $t_2 \in I$ tal que $(t, \varphi(t)) \notin K$ para todo $t \in (t_2, t_1)$.

(II) Existe el límite $x_1 = \lim_{t \rightarrow t_1^-} \varphi(t)$, tal que $(t_1, x_1) \in \Omega$ y

$$(t_1, \varphi(t_1) + f(t_1, \varphi(t_1))\mu(\{t_1\})) \notin \Omega.$$

La demostración de este resultado se puede ver en [5, Teorema 5.5].

3.2.3. Teorema de Cambio de Variables

Vamos a demostrar una generalización del Teorema de Cambio de Variables [5, Teorema 6.1], para el caso donde $|F''| < M$, el cual usaremos para demostrar una desigualdad del tipo Gronwall. Empecemos enunciando el siguiente lema de cubrimiento demostrado en [10, Corolario I, p 35].

Si bien la etiqueta de las referencias bibliográficas no se ven impresas, habría que respetar la ortografía. Por ejemplo, usar Evans en lugar de Evanz. Y en la sección Bibliografía, habría que uniformizar la presentación de los autores (en algunos casos aparecen los nombres completos, en otros sólo la inicial).

Lema 3.12 (Lema de cubrimiento). Sea μ una medida de Borel en \mathbb{R}^n , y \mathcal{F} cualquier colección de bolas cerradas. Sea A el conjunto de los centros de las bolas en \mathcal{F} . Supongamos que $\mu(A) < \infty$ y $\inf\{r \mid B(a, r) \in \mathcal{F}\} = 0$ para cada $a \in A$. Entonces, para todo conjunto abierto $U \subset \mathbb{R}^n$ existe una sucesión numerable \mathcal{G} de bolas de \mathcal{F} tal que

$$\bigcup_{B \in \mathcal{G}} B \subset U \quad y \quad \mu \left((A \cap U) \setminus \bigcup_{B \in \mathcal{G}} B \right) = 0.$$

Teorema 3.13. *Asumamos que $J \subset \mathbb{R}$ es un intervalo abierto. Sea $F : J \rightarrow \mathbb{R}$ una función diferenciable tal que F' es acotada y absolutamente continua. Además, supongamos que existe $M \geq 0$ tal que $F'' > -M$. Entonces, para toda función $g : I \rightarrow J$ creciente y continua a izquierda, donde I es un intervalo abierto, y para todo $A \in \mathcal{B}(I)$ vale que*

$$\int_A F'(g(s)) \, dg \leq \mu_{F \circ g}(A) + \frac{M}{2} \sum_{t \in D \cap A} \mu_g(\{\tau\})^2,$$

donde $D = \{\tau \in I \mid \mu_g(\{\tau\}) > 0\}$.

Observación 3.14. El Teorema 6.1 de [5] se deduce del Teorema 3.13 tomando $M = 0$, pues F sería convexa y

$$\int_A F'(g(s)) \, dg \leq \mu_{F \circ g}(A),$$

para todo $A \in \mathcal{B}(I)$.

Antes de comenzar con la demostración, vamos a ver los siguientes lemas que nos serán útiles.

Lema 3.15. *Sea F bajo las hipótesis del Teorema 3.13. Supongamos que $|F'| \leq R$, entonces para cualquier función $g : I \rightarrow J$ creciente y continua a izquierda, y para $[a, b] \subset I$ vale que*

$$|\mu_{F \circ g}([a, b])| \leq R\mu_g([a, b]). \quad (3.2.2)$$

En particular, vale que $\mu_{F \circ g} \ll \mu_g$.

Dem. Para $[a, b] \subset I$, llamemos $x = g(a)$ e $y = g(b)$. Como g es creciente entonces $x < y$, y dado que F' es continua, podemos aplicar el teorema del valor medio del cálculo diferencial. Luego, existe en $c \in (x, y)$ tal que

$$\frac{|F(y) - F(x)|}{y - x} = |F'(c)| \leq \sup_{t \in J} |F'(t)|,$$

y como $|F'| < R$ para $R > 0$, entonces

$$|F(y) - F(x)| \leq R(y - x). \quad (3.2.3)$$

Por lo tanto, para todo intervalo $[a, b] \in I$

$$|\mu_{F \circ g}([a, b])| \leq R\mu_g([a, b]).$$

Ahora, para $(a, b) \in \mathcal{B}(I)$ se tiene que

$$\begin{aligned} |\mu_{F \circ g}((a, b))| &= \left| \mu_{F \circ g} \left(\bigcup_{n=1}^{\infty} \left[a + \frac{1}{n}, b \right) \right) \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \mu_{F \circ g} \left(\left[a + \frac{1}{n}, b \right) \right) \right| \\ &\leq R \lim_{n \rightarrow \infty} \mu_g \left(\left[a + \frac{1}{n}, b \right) \right) = R\mu_g((a, b)). \end{aligned} \quad (3.2.4)$$

Sea $A \in \mathcal{B}(I)$, $\forall \epsilon > 0$ existe una sucesión de intervalos disjuntos (a_i, b_i) tal que $A \subset \bigcup_{i=1}^{\infty} (a_i, b_i)$ y por [12, Lema 1.7]

$$\sum_{i=1}^{\infty} \mu_g(a_i, b_i) \leq \mu_g(A) + \epsilon,$$

luego por (3.2.4)

$$\mu_{F \circ g}(A) \leq \sum_{i=1}^{\infty} \mu_{F \circ g}(a_i, b_i) \leq R \sum_{i=1}^{\infty} \mu_g(a_i, b_i) \leq \mu_g(A) + \epsilon. \quad (3.2.5)$$

Por otro lado, existe una sucesión de intervalos disjuntos (a_j, b_j) tal que

$$\sum_{j=1}^{\infty} \mu_{F \circ g}(a_j, b_j) \leq \mu_{F \circ g}(A) + \epsilon,$$

usando nuevamente (3.2.4) llegamos a que

$$-R \sum_{j=1}^{\infty} \mu_g(a_j, b_j) \leq \sum_{j=1}^{\infty} \mu_{F \circ g}(a_j, b_j) \leq \mu_{F \circ g}(A) + \epsilon.$$

Tomando supremo sobre los intervalos (a_j, b_j) cuya unión numerable contienen al conjunto A , vemos que

$$\begin{aligned} -R\mu_g(A) = R \sup \left\{ - \sum_{j=1}^{\infty} \mu_g(a_j, b_j) \mid A \subset \bigcup_{j=1}^{\infty} (a_j, b_j) \right\} \\ \leq \mu_{F \circ g}(A) + \epsilon. \end{aligned} \quad (3.2.6)$$

Luego de (3.2.5) y (3.2.6), tenemos que $\forall \epsilon > 0$

$$-\mu_g(A) - \epsilon \leq \mu_{F \circ g}(A) \leq \mu_g(A) + \epsilon. \quad (3.2.7)$$

Por lo tanto, para todo conjunto $A \in \mathcal{B}(I)$ vale que

$$|\mu_{F \circ g}(A)| \leq R\mu_g(A).$$

De lo anterior, podemos deducir que $\forall \epsilon > 0$ existe $\delta = \epsilon/R$ tal que si $\mu_g(A) \leq \delta$ entonces $|\mu_{F \circ g}(A)| \leq \epsilon$, y por el [12, Teorema 3.5] es necesario y suficiente que $\mu_{F \circ g} \ll \mu_g$.

□

Lema 3.16. *Asumamos $J \subset \mathbb{R}$ un intervalo abierto. Sea $F : J \rightarrow \mathbb{R}$ con las hipótesis del Teorema (3.13). Entonces, para cualquier función continua y creciente $g : I \rightarrow J$, donde I es un intervalo abierto, y para todo $A \in \mathcal{B}(I)$ vale que*

$$\int_A F'(g(s)) dg = \mu_{F \circ g}(A). \quad (3.2.8)$$

Observación 3.17. Como g es continua, entonces $F \circ g$ también lo es. Por lo tanto

$$\mu_{F \circ g}([a, b)) = \mu_{F \circ g}((a, b)) = \mu_{F \circ g}([a, b]),$$

lo cual no es verdadero si g es únicamente continua a izquierda (ver [8, Ejemplo 4.1.1]).

Dem. Para todo intervalo $(t_1, t_2) \subset I$, como g es continua y creciente resulta que $(g(t_1), g(t_2))$ es un intervalo de J , luego por [8, Teorema 6.2.1]

$$\begin{aligned} \mu_{F \circ g}((t_1, t_2)) &= F(g(t_2)) - F(g(t_1)) \\ &= \int_{g(t_1)}^{g(t_2)} F'(s) ds = \int_{(t_1, t_2)} F'(g(s)) dg. \end{aligned} \quad (3.2.9)$$

Como para todo conjunto abierto $A \in \mathcal{B}(I)$, existe una sucesión de intervalos disjuntos y abiertos tal que $A = \bigcup_{i=1}^{\infty} (a_i, b_i)$. Entonces vale que

$$\begin{aligned} \mu_{F \circ g}(A) &= \mu_{F \circ g} \left(\bigcup_{i=1}^{\infty} (a_i, b_i) \right) = \sum_{i=1}^{\infty} \mu_{F \circ g}((a_i, b_i)) \\ &= \int_{\bigcup_{i=1}^{\infty} (a_i, b_i)} F'(g(s)) dg = \int_A F'(g(s)) dg. \end{aligned}$$

□

Dem. Teorema (3.13). Sea $A \in \mathcal{B}(I)$, vamos a ver primero el caso particular cuando $A \cap D$ se reduce a un punto. Para cualesquiera x e y en J , por el teorema de Taylor (ver [10, pg 13]), existe c entre x e y tal que

$$F(y) = F(x) + F'(x)(y - x) + 1/2 F''(c)(y - x)^2.$$

Como $F'' > -M$, entonces

$$F(y) > F(x) + F'(x)(y - x) - \frac{M}{2}(y - x)^2,$$

o equivalentemente

$$F'(x)(y - x) < F(y) - F(x) + \frac{M}{2}(y - x)^2. \quad (3.2.10)$$

Como dijimos, supongamos $A \cap D = \{\tau_0\}$, entonces para $n \in \mathbb{N}$ tenemos que

$$\begin{aligned} \int_A F'(g(s)) dg &= \\ \int_{\{\tau_0\}} F'(g(s)) dg + \int_{(\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n})} F'(g(s)) dg + \int_{A \setminus [\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n})} F'(g(s)) dg \\ &=: I_1 + I_2 + I_3. \end{aligned}$$

Vamos a estimar cada integral por separado.

Por (3.2.10) tenemos que

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_{\{\tau_0\}} F'(g(s)) dg(s) = F'(g(\tau_0)) [g(\tau_0^+) - g(\tau_0)] \leq \\ &\leq F(g(\tau_0^+)) - F(g(\tau_0)) + \frac{M}{2} [g(\tau_0^+) - g(\tau_0)]^2, \end{aligned}$$

es decir

$$I_1 \leq \mu_{F \circ g}(\{\tau_0\}) + \frac{M}{2} [\mu_g(\{\tau_0\})]^2. \quad (3.2.11)$$

Para acotar I_2 , como

$$\bigcap_{n=1}^{\infty} \left(\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n} \right) = \emptyset \text{ y } \left(\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n} \right) \supset \left(\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n+1} \right)$$

entonces $\lim_{n \rightarrow \infty} \mu_g \left(\left(\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n} \right) \right) = 0$. Luego, para todo $\epsilon > 0$ existe un n_0 tal que $\forall n > n_0$ vale que $\mu_g \left(\left(\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n} \right) \right) < \epsilon$; y, como F' está acotada, existe $R > 0$ tal que

$$|I_2| \leq \int_{(\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n})} |F'(g(s))| dg \leq R \mu_g \left(\left(\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n} \right) \right) < R\epsilon.$$

Finalmente para estimar I_3 , como para todo $t \in A \setminus [\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n})$ vale que $\mu_g(\{t\}) = 0$, entonces por la observación 2.18 g es continua en $A \setminus [\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n})$. Luego podemos aplicar el lema 3.16 en I_3 ,

$$I_3 = \int_{A \setminus [\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n})} F'(g(s)) dg = \mu_{F \circ g} \left(A \setminus \left[\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n} \right) \right).$$

Luego por (I_1) , (I_2) y (I_3) tenemos que $\forall \epsilon > 0$

$$\begin{aligned} \int_A F'(g(s)) dg &= \int_{\{\tau_0\}} F'(g(s)) dg + \int_{(\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n})} F'(g(s)) dg \\ &\quad + \int_{A \setminus [\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n})} F'(g(s)) dg \\ &\leq \mu_{F \circ g}(\{\tau_0\}) + \frac{M}{2} [\mu_g(\{\tau_0\})]^2 + R\epsilon \\ &\quad + \mu_{F \circ g} \left(A \setminus \left[\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n} \right) \right). \end{aligned}$$

Como $\mu_{F \circ g}(\{\tau_0\}) + \mu_{F \circ g} \left(A \setminus \left[\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n} \right) \right) = \mu_{F \circ g} \left(A \setminus \left(\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n} \right) \right)$ y además

$$\bigcap_{n=1}^{\infty} \left(\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n} \right) = \emptyset, \text{ entonces}$$

$$\bigcup_{n=1}^{\infty} A \setminus \left(\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n} \right) = A \quad \text{y} \quad \mu_{F \circ g}(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu_{F \circ g} \left(A \setminus \left(\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n} \right) \right).$$

Tomando n suficientemente grande obtenemos

$$\mu_{F \circ g} \left(A \setminus \left(\tau_0, \tau_0 + \frac{1}{n} \right) \right) \leq \epsilon + \mu_{F \circ g}(A).$$

Luego,

$$\int_A F'(g(s)) dg \leq \frac{M}{2} [\mu_g(\{\tau_0\})]^2 + R\epsilon + \epsilon + \mu_{F \circ g}(A),$$

y haciendo tender ϵ a 0 concluimos que

$$\int_A F'(g(s)) dg \leq \mu_{F \circ g}(A) + \frac{M}{2} [\mu_g(\{\tau_0\})]^2. \quad (3.2.12)$$

Supongamos ahora que $A \in \mathcal{B}(I)$ es un conjunto abierto cualquiera. Luego por el lema 3.15 y [12, Teorema 3.5], para cualquier $\epsilon > 0$ va a existir $\delta_1 = \epsilon/R$ tal que si $\mu_g(A) < \delta_1$, entonces

$$\int_A |F'(g(s))| dg(s) < \epsilon. \quad (3.2.13)$$

Por otro lado, como F' es uniformemente continua entonces existe $\delta_2 < \epsilon$ tal que

$$|t_1 - t_2| \leq \delta_2 \Rightarrow |F'(t_1) - F'(t_2)| \leq \epsilon. \quad (3.2.14)$$

Sea $B = \{s \in A \mid \mu_g(\{s\}) \geq \delta_2\}$, como μ_g es una medida finita, entonces B es un conjunto finito, es decir $B = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$. Para $j \in \mathbb{N}$ consideremos el conjunto $B_j = \bigcup_{i=1}^m (s_i, s_i + 1/j]$. Como $\bigcap_{j=1}^{\infty} B_j = \emptyset$ entonces $\lim_{j \rightarrow \infty} \mu_g(B_j) = 0$, por lo tanto existe $j_0 \in \mathbb{N}$ tal que $\mu_g(B_{j_0}) < \delta_1$, y por (3.2.13)

$$\int_{B_{j_0}} |F'(g(s))| dg(s) < \epsilon.$$

Sea $C = A \setminus B_{j_0}$, observemos que

- C es un conjunto abierto.
- Si $t \in C$ entonces

$$\delta_2 > \mu_g(\{t\}) = \mu_g \left(\bigcap_{k=1}^{\infty} [t - 1/k, t + 1/k] \right) = \lim_{k \rightarrow \infty} \mu_g([t - 1/k, t + 1/k])$$

y existe k_0 tal que $\forall k > k_0$

$$\mu_g([t - 1/k, t + 1/k]) \leq \delta_2,$$

luego llamando $\delta_t = 1/k_0$ podemos decir que $\mu_g([t - \delta_t, t + \delta_t]) < \delta_2$.

Por lo tanto, para cada $t \in C$ existe δ_t tal que $\mu_g([t - \delta_t, t + \delta_t]) < \delta_2$, es decir podemos cubrir el conjunto C con elementos de la familia de bolas cerradas $\mathcal{F} = \{[t - \delta, t + \delta] \mid t \in C \text{ y } \delta \leq \delta_t\}$.

Usando el Lema de cubrimiento 3.12 tomando $U = C$, existen un subcubrimiento numerable, es decir, existe $t_n \in C$ y $\delta_n > 0$ tal que los intervalos

$[t_n - \delta_n, t_n + \delta_n]$ son disjuntos, $\bigcup_{n=1}^{\infty} [t_n - \delta_n, t_n + \delta_n] \subset C$ y

$$\mu_g \left(C \setminus \bigcup_{n=1}^{\infty} [t_n - \delta_n, t_n + \delta_n] \right) = 0. \quad (3.2.15)$$

Además, si $r_1, r_2 \in [t_n - \delta_n, t_n + \delta_n]$ entonces

$$|g(r_1) - g(r_2)| \leq \mu_g([t_n - \delta_n, t_n + \delta_n]) < \delta_2 \quad (3.2.16)$$

y por (3.2.14),

$$|F'(g(r_1)) - F'(g(r_2))| \leq \epsilon \quad \forall r_1, r_2 \in [t_n - \delta_n, t_n + \delta_n] \quad (3.2.17)$$

Luego, como $A = \overline{B_{j_0}} \cup C = B \cup B_{j_0} \cup C$,

$$\begin{aligned} \int_A F'(g(s))dg(s) &= \sum_{i=1}^m \left[\int_{\{s_i\}} F'(g(s))dg(s) \right] \\ &\quad + \int_{B_{j_0}} F'(g(s))dg(s) + \int_C F'(g(s))dg(s). \end{aligned}$$

Dado que $|\mu_g(B_{j_0})| < \delta_1$, por (3.2.13), (3.2.15) y (3.2.10)

$$\begin{aligned} &\int_A F'(g(s))dg(s) \\ &\leq \sum_{i=1}^m [F'(g(s_i)) (g(s_i^+) - g(s_i))] + \epsilon + \sum_{n=1}^{\infty} \int_{[t_n - \delta_n, t_n + \delta_n]} F'(g(s))dg(s) \\ &\leq \sum_{i=1}^m \left[(F(g(s_i^+) - F(g(s_i))) + \frac{M}{2} (g(s_i^+) - g(s_i))^2 \right] + \epsilon \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} \int_{[t_n - \delta_n, t_n + \delta_n]} F'(g(s))dg(s), \end{aligned}$$

sumo y resto $F'(g(t_n - \delta_n))$ en la última integral,

$$\begin{aligned} \int_A F'(g(s))dg(s) &\leq \mu_{F \circ g}(B) + \frac{M}{2} \sum_{i=1}^m [\mu_g(\{s_i\})]^2 + \epsilon \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} \int_{[t_n - \delta_n, t_n + \delta_n]} F'(g(s)) - F'(g(t_n - \delta_n))dg(s) \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} \int_{[t_n - \delta_n, t_n + \delta_n]} F'(g(t_n - \delta_n))dg(s). \end{aligned}$$

Integrando en la primera sumatoria, y usando (3.2.17) en la segunda, tenemos que

$$\begin{aligned} \int_A F'(g(s))dg(s) &\leq \mu_{F \circ g}(B) + \frac{M}{2} \sum_{i=1}^m [\mu_g(\{s_i\})]^2 \\ &\quad + \epsilon \sum_{n=1}^{\infty} \mu_g([t_n - \delta_n, t_n + \delta_n]) \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} F'(g(t_n - \delta_n))\mu_g([t_n - \delta_n, t_n + \delta_n]) + \epsilon, \end{aligned} \tag{3.2.18}$$

la última sumatoria la podemos acotar de la siguiente manera,

$$\begin{aligned} &F'(g(t_n - \delta_n))\mu_g([t_n - \delta_n, t_n + \delta_n]) \\ &= F'(g(t_n - \delta_n)) [g((t_n + \delta_n)^+) - g(t_n - \delta_n)], \end{aligned}$$

vuelvo a usar (3.2.10)

$$\begin{aligned} &F'(g(t_n - \delta_n))\mu_g([t_n - \delta_n, t_n + \delta_n]) \leq F(g((t_n + \delta_n)^+)) - F(g(t_n - \delta_n)) \\ &\quad + \frac{M}{2} [g((t_n + \delta_n)^+) - g(t_n - \delta_n)]^2 \end{aligned}$$

o equivalentemente,

$$F'(g(t_n - \delta_n))\mu_g([t_n - \delta_n, t_n + \delta_n]) \leq \mu_{F \circ g}([t_n - \delta_n, t_n + \delta_n]) + \frac{M}{2} [\mu_g([t_n - \delta_n, t_n + \delta_n])]^2,$$

Por lo tanto la ecuación (3.2.18) nos queda

$$\begin{aligned} \int_A F'(g(s))dg(s) &\leq \mu_{F \circ g}(B) + \frac{M}{2} \sum_{i=1}^m [\mu_g(\{s_i\})]^2 \\ &\quad + \epsilon + \epsilon \mu_g \left(\bigcup_{n=1}^{\infty} [t_n - \delta_n, t_n + \delta_n] \right) \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\mu_{F \circ g}([t_n - \delta_n, t_n + \delta_n]) + \frac{M}{2} [\mu_g([t_n - \delta_n, t_n + \delta_n])]^2 \right]. \end{aligned}$$

Como los intervalos $[t_n + \delta_n, t_n - \delta_n]$ son disjuntos y cubren casi todo C , salvo en un conjunto μ_g -nulo, entonces

$$\begin{aligned} \int_A F'(g(s))dg(s) &\leq \mu_{F \circ g}(B) + \frac{M}{2} \sum_{i=1}^m [\mu_g(\{s_i\})]^2 + \epsilon + \epsilon \mu_g(C) \\ &\quad + \mu_{F \circ g} \left(\bigcup_{n=1}^{\infty} [t_n + \delta_n, t_n - \delta_n] \right) + \frac{M}{2} \sum_{n=1}^{\infty} [\mu_g([t_n + \delta_n, t_n - \delta_n])]^2. \end{aligned}$$

Dado que $\bigcup_{n=1}^{\infty} [t_n + \delta_n, t_n - \delta_n]$ cubre todo el conjunto C salvo un conjunto $\mu_{F \circ g}$ -nulo y (3.2.16), tenemos que

$$\begin{aligned} \int_A F'(g(s))dg(s) &\leq \mu_{F \circ g}(B) + \frac{M}{2} \sum_{i=1}^m [\mu_g(\{s_i\})]^2 + \epsilon + \epsilon \mu_g(C) \\ &\quad + \mu_{F \circ g}(C) + \frac{M}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \delta_2 \mu_g([t_n + \delta_n, t_n - \delta_n]). \end{aligned}$$

Dado que $C = A \setminus \overline{B_{j_0}} = A \setminus (B \cup B_{j_0})$ entonces, por el modo en que elegimos B_{j_0} vale que

$$\mu_{F \circ g}(A) = \mu_{F \circ g}(B) + \mu_{F \circ g}(B_{j_0}) + \mu_{F \circ g}(C).$$

Además por (3.2.3) tenemos que

$$|\mu_{F \circ g}(B_{j_0})| \leq R \mu_g(B_{j_0}) \leq R \delta_1 = \epsilon,$$

entonces

$$\mu_{F \circ g}(A) \geq \mu_{F \circ g}(B) - \epsilon + \mu_{F \circ g}(C).$$

Reemplazando en (3.2.3) tenemos que

$$\begin{aligned} \int_A F'(g(s))dg(s) &\leq \mu_{F \circ g}(A) + \frac{M}{2} \sum_{i=1}^m [\mu_g(\{s_i\})]^2 + \epsilon(2 + \mu_g(C)) \\ &\quad + \frac{M}{2} \delta_2 \sum_{n=1}^{\infty} \mu_g([t_n + \delta_n, t_n - \delta_n]). \end{aligned}$$

Como $\delta_2 \leq \epsilon$

$$\int_A F'(g(s))dg(s) \leq \mu_{F \circ g}(A) + \frac{M}{2} \sum_{i=1}^m [\mu_g(\{s_i\})]^2 + \epsilon(2 + \mu_g(C)) + \frac{M\epsilon}{2} \mu_g(C),$$

cuando $\epsilon \rightarrow 0$, entonces $\delta_2 \rightarrow 0$ y por lo tanto el conjunto $B = \{s \in A \mid \mu_g(\{s\}) \geq \delta_2\}$ es igual a $D \cap A = \{s \in A \mid \mu_g(\{s\}) > 0\}$ y tenemos que

$$\int_A F'(g(s))dg(s) \leq \mu_{F \circ g}(A) + \frac{M}{2} \sum_{s \in D \cap A} [\mu_g(\{s\})]^2. \quad (3.2.19)$$

□

Podemos generalizar el Teorema 3.13 de la siguiente manera

Teorema 3.18. *Sea $J \subset \mathbb{R}$ un intervalo abierto, $F : J \rightarrow \mathbb{R}$ una función diferenciable tal que F' es acotada y absolutamente continua. Además, supongamos que existe $M \geq 0$ tal que $|F''| < M$. Entonces, para toda función $g : I \rightarrow J$ creciente y continua a izquierda, donde I es un intervalo y para todo $A \in \mathcal{B}(I)$ vale que*

$$\left| \int_A F'(g(s)) dg - \mu_{F \circ g}(A) \right| \leq \frac{M}{2} \sum_{\tau \in D \cap A} [\mu_g(\{\tau\})]^2,$$

donde $D = \{\tau \in I \mid \mu_g(\{\tau\}) > 0\}$.

Dem. Como $|F''| < M$, entonces $F'' > -M$ y usando el teorema 3.13

$$\int_A F'(g(s)) dg - \mu_{F \circ g}(A) \leq \frac{M}{2} \sum_{\tau \in D \cap A} [\mu_g(\{\tau\})]^2. \quad (3.2.20)$$

Por otro lado, si $H = -F$ vale que $H'' = -F''$ y $F'' < M$ entonces $H'' > -M$ y podemos aplicar el teorema 3.13 a H , y tenemos que

$$\int_A H'(g(s)) dg \leq \mu_{H \circ g}(A) + \frac{M}{2} \sum_{\tau \in D \cap A} [\mu_g(\{\tau\})]^2. \quad (3.2.21)$$

Como para todo intervalo $[a, b] \subset I$

$$\mu_{H \circ g}([a, b]) = H(g(b)) - H(g(a)) = -(F(g(b)) - F(g(a))) = -\mu_{F \circ g}([a, b])$$

por el [12, Lema 1.17] podemos extender la igualdad a todo conjunto $A \in \mathcal{B}(I)$. Luego, de (3.2.21) tenemos que

$$\int_A -F'(g(s)) dg \leq -\mu_{F \circ g}(A) + \frac{M}{2} \sum_{\tau \in D \cap A} [\mu_g(\{\tau\})]^2,$$

o equivalentemente,

$$-\frac{M}{2} \sum_{\tau \in D \cap A} \mu_g(\{\tau\}) \leq \int_A F'(g(s)) dg - \mu_{F \circ g}(A). \quad (3.2.22)$$

Por lo tanto, de (3.2.20) y (3.2.22), concluimos que

$$-\frac{M}{2} \sum_{\tau \in D \cap A} \mu_g(\{\tau\}) \leq \int_A F'(g(s)) dg - \mu_{F \circ g}(A) \leq \frac{M}{2} \sum_{\tau \in D \cap A} [\mu_g(\{\tau\})]^2$$

$$\left| \int_A F'(g(s)) dg - \mu_{F \circ g}(A) \right| \leq \frac{M}{2} \sum_{\tau \in D \cap A} [\mu_g(\{\tau\})]^2.$$

□

3.3. Método Shooting

Como vimos en la sección anterior, bajo las hipótesis del teorema 3.8 existe $\varphi_\alpha : [0, T] \rightarrow \mathbb{R}^n$, solución al problema de valores iniciales

$$\begin{cases} d(\varphi) = f(t, \varphi(t))d\mu \\ \varphi(0) = \alpha. \end{cases} \quad (P)$$

El método Shooting consiste en hallar un $\alpha \in \mathbb{R}^n$ tal que $\varphi_\alpha(T) = \alpha$. Por lo tanto, para ese valor de α la solución al problema de valores iniciales $\varphi_\alpha(t)$ es también solución al problema periódico

$$\begin{cases} d(\varphi) = f(t, \varphi(t))d\mu \\ \varphi(0) = \varphi(T). \end{cases}$$

3.3.1. Desigualdad de Gronwall

Enunciaremos primero una generalización para medidas de Borel del teorema de integración por partes, a continuación demostraremos una desigualdad del tipo Gronwall pero para medidas continuas y por último una desigualdad mejorada para una medida de Borel positiva cualquiera.

Teorema 3.19. *Sea $I \subset \mathbb{R}$ un intervalo y sean $f, g \in BV(I, \mathbb{R})$ continuas a izquierda. Supongamos que D es el conjunto donde f y g son simultáneamente discontinuas. Entonces para todo conjunto de Borel $A \subset I$*

$$\int_A f \, dg + \int_A g \, df = \mu_{fg}(A) - \sum_{\tau \in D \cap A} \mu_f(\{\tau\})\mu_g(\{\tau\}). \quad (3.3.1)$$

La demostración de este teorema se puede ver en [8, Teorema 6.2.2].

Lema 3.20. *Sea μ una medida finita, positiva y continua. Si $u \in L^1(\mu)$ tal que*

$$u(t) \leq c + \int_{[0,t)} u(r) \, d\mu.$$

Entonces $u(t) \leq ce^{\mu([0,t))}$.

Dem. Si llamamos $w(t) = c + \int_{[0,t)} u(r) \, d\mu(r)$, la medida de Lebesgue-Stieljes μ_w asociada w satisface

$$\mu_w([t_1, t_2)) = w(t_2) - w(t_1) = \int_{[t_1, t_2)} u(r) \, d\mu.$$

Luego, por el [12, Teorema 3.5], $\mu_w \ll \mu$ y para toda función $g \in L^1(\mu)$ y cualquier conjunto A de Borel, vale que

$$\int_A g(r) \, dw = \int_A u(r)g(r) \, d\mu.$$

Como $u(r) \leq w(r)$,

$$\begin{aligned} \int_{[0,t)} \exp(-\mu([0, r))) \, dw &= \int_{[0,t)} \exp(-\mu([0, r))) u(r) \, d\mu \\ &\leq \int_{[0,t)} \exp(-\mu([0, r))) w(r) \, d\mu. \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

Sea $F(s) = -e^{-s}$ y $h(t) = \mu([0, t])$, entonces la desigualdad (3.3.2) se puede escribir como

$$\int_{[0,t)} -F(h(r)) dw \leq \int_{[0,t)} F'(h(r))w(r) d\mu, \quad (3.3.3)$$

como F es una función diferenciable, su derivada está acotada y es absolutamente continua y $F'' > -2$ en $[0, T]$; y h es una función continua pues la medida es continua. Entonces podemos aplicar el lema 3.16, por lo cual tenemos

$$\int_{[0,t)} F'(h(r)) d\mu = \mu_{F \circ h}([0, t))$$

y como $w \in L^1(\mu)$ entonces

$$\int_{[0,t)} F'(h(r))w(r) d\mu = \int_{[0,t)} w(r) d\mu_{F \circ h}.$$

Si reemplazo en la ecuación (3.3.3), tenemos que

$$\int_{[0,t)} -F(h(r)) dw \leq \int_{[0,t)} F'(h(r))w(r) d\mu = \int_{[0,t)} w(r) d\mu_{F \circ h},$$

en otras palabras

$$0 \leq \int_{[0,t)} F(h(r)) dw + \int_{[0,t)} w(r) d\mu_{F \circ h}.$$

Luego usando el Teorema 3.19 y que la medida μ es continua, tenemos que

$$0 \leq \int_{[0,t)} F(h(r)) dw + \int_{[0,t)} w(r) d\mu_{F \circ h} = \mu_{(F \circ h)w}([0, t))$$

y como $F(h(r)) = -\exp(-\mu([0, r]))$ entonces

$$0 \leq F(h(t)).w(t) - F(h(0))w(0) = -\exp(-\mu([0, t]))w(t) - (-1)c.$$

Entonces

$$\exp(-\mu([0, t]))w(t) \leq c$$

luego

$$u(t) \leq w(t) \leq c \exp(\mu([0, t]))$$

□

Definición 3.21. Sea μ una medida positiva finita. Si

$$D = \{\tau \in [0, T] \mid \mu(\{\tau\}) > 0\},$$

para todo A conjunto de Borel definimos

$$\mu_a(A) = \sum_{\tau \in D \cap A} \mu(\{\tau\}).$$

Observación 3.22.

1. Sea μ_a una medida y sea $\{E_j\}_{j=1}^{\infty} \subset \mathcal{B}$ una sucesión de conjuntos disjuntos, entonces

$$\begin{aligned} \mu_a \left(\bigcup_{j=1}^{\infty} E_j \right) &= \sum_{\tau \in D \cap (\cup E_j)} \mu(\{\tau\}) = \sum_{j=1}^{\infty} \left(\sum_{\tau \in D \cap E_j} \mu(\{\tau\}) \right) \\ &= \sum_{j=1}^{\infty} \mu_a(E_j). \end{aligned}$$

2. La medida $\mu_a \leq \mu$.
3. Si llamamos $\bar{\mu} = \mu - \mu_a$, luego $\bar{\mu}$ es una medida positiva, finita y además, $\bar{\mu} \leq \mu$. Como para todo τ tenemos que $\mu(\{\tau\}) = \mu_a(\{\tau\})$, entonces $\bar{\mu}$ es una medida continua.

Vamos a necesitar un resultado elemental cuya demostración está en [2, Teorema 8.1.1].

Teorema 3.23. Sea $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de números reales positivos. Entonces $\sum_{n=1}^{\infty} a_n < \infty$ si y sólo si $\prod_{n=1}^{\infty} (1 + a_n)$ es convergente. En tal caso, vale la desigualdad

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \leq \prod_{n=1}^{\infty} (1 + a_n) \leq \exp \left(\sum_{n=1}^{\infty} a_n \right).$$

Teorema 3.24 (Desigualdad Mejorada de Gronwall). Sea μ una medida finita, positiva. Si $u \in L^1(\mu)$ tal que

$$u(t) \leq c + \int_{[0,t)} u(r) d\mu.$$

Entonces

$$u(t) \leq cK(t)e^{K(t)\bar{\mu}([0,t))},$$

donde $K(t) = \prod_{\tau \in D \cap [0,t)} (1 + \mu(\{\tau\}))$.

Dem. Sea $[0, t) \subset [0, T]$, como μ es una medida finita, por el Lema 2.29, D es un conjunto numerable, y podemos suponer que $D \cap [0, t) = \{t_n\}_{n=1}^{\infty}$. Además, dado que

$$\mu(D \cap [0, t)) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(\{t_n\}) < \infty, \quad (3.3.4)$$

entonces por el Teorema 3.23

$$K(t) = \prod_{\tau \in D \cap [0,t)} (1 + \mu(\{\tau\})) = \prod_{n=1}^{\infty} (1 + \mu(\{t_n\})) < \infty.$$

Sea $\epsilon > 0$, por la absoluta continuidad de la integral existe $\delta > 0$ tal que

$$\text{si } \mu(A) \leq \delta \quad \text{entonces} \quad \left| \int_A u(r) d\mu \right| \leq \epsilon.$$

Ahora por (3.3.4) existe $N \in \mathbb{N}$ tal que $\sum_{n=N+1}^{\infty} \mu(\{t_n\}) \leq \delta$. Sin perder generalidad, al conjunto $\{t_1, \dots, t_N\}$ lo puedo considerar ordenado de menor a mayor ya que es finito. Si llamamos $w(t) = c + \int_{[0,t)} u(s) d\mu$, entonces para $t > t_N$ vale que

$$w(t) = c + \int_{[0,t_N)} u(s) d\mu + \int_{\{t_N\}} u(s) d\mu + \int_{(t_N,t)} u(s) d\mu.$$

Escribiendo la primera integral como $w(t_N)$ y dado que $u(t_N) \leq w(t_N)$ tenemos que

$$\begin{aligned} w(t) &= w(t_N) + u(t_N)\mu(\{t_N\}) + \int_{(t_N,t)} u(s) d\mu \\ &\leq w(t_N) [1 + \mu(\{t_N\})] + \int_{(t_N,t)} u(s) d\mu, \end{aligned}$$

es decir,

$$w(t) \leq w(t_N) [1 + \mu(\{t_N\})] + \int_{(t_N,t)} u(s) d\mu. \quad (3.3.5)$$

Calculando $w(t_N)$ obtenemos la siguiente desigualdad

$$\begin{aligned} w(t_N) &= c + \int_{[0,t_{N-1})} u(s) d\mu(s) + \int_{\{t_{N-1}\}} u(s) d\mu + \int_{(t_{N-1},t_N)} u(s) d\mu \\ w(t_N) &\leq w(t_{N-1}) [1 + \mu(\{t_{N-1}\})] + \int_{(t_{N-1},t_N)} u(s) d\mu. \end{aligned} \quad (3.3.6)$$

Reemplazando en la ecuación (3.3.5) y dado que $1 < [1 + \mu(\{t_N\})]$, tenemos que

$$\begin{aligned} w(t) &\leq w(t_{N-1}) [1 + \mu(\{t_{N-1}\})] [1 + \mu(\{t_N\})] \\ &\quad + [1 + \mu(\{t_N\})] \int_{(t_{N-1},t)-\{t_N\}} u(s) d\mu. \end{aligned}$$

Si en la ecuación (3.3.6) cambiamos t_N por t_{N-1} y así sucesivamente, obtendremos que

$$\begin{aligned} w(t) &\leq w(t_1) [1 + \mu(\{t_1\})] \cdots [1 + \mu(\{t_N\})] + \\ &\quad [1 + \mu(\{t_2\})] \cdots [1 + \mu(\{t_N\})] \int_{(t_1,t)-\{t_2,\dots,t_N\}} u(s) d\mu, \end{aligned}$$

por como definimos a w deducimos que

$$\begin{aligned} w(t) &\leq [1 + \mu(\{t_1\})] \cdots [1 + \mu(\{t_N\})] \left(c + \int_{[0,t_1)} u(s) d\mu \right) \\ &\quad + [1 + \mu(\{t_2\})] \cdots [1 + \mu(\{t_N\})] \int_{(t_1,t)-\{t_2,\dots,t_N\}} u(s) d\mu \end{aligned}$$

como $1 < [1 + \mu(\{t_2\})] \cdots [1 + \mu(\{t_N\})] < \prod_{i=1}^N [1 + \mu(\{t_i\})] < K(t)$ y la medida μ es positiva

$$w(t) \leq cK(t) + K(t) \int_{[0,t) - \{t_1, \dots, t_N\}} u(s) d\mu. \quad (3.3.7)$$

Si descomponemos la medida μ como la suma de dos medidas $\mu = \mu_a + \bar{\mu}$, donde μ_a se define como en la Definición 3.21, entonces

$$\begin{aligned} w(t) &\leq cK(t) + K(t) \int_{[0,t) - \{t_1, \dots, t_N\}} u(s) d\mu_a \\ &\quad + K(t) \int_{[0,t) - \{t_1, \dots, t_N\}} u(s) d\bar{\mu}. \end{aligned} \quad (3.3.8)$$

Por otro lado, dado que D es el conjunto de todos los puntos de discontinuidad de μ , entonces tenemos que

$$\int_{[0,t) - \{t_1, \dots, t_N\}} u(s) d\mu_a = \int_{[0,t) - D} u(s) d\mu_a + \int_{D - \{t_1, \dots, t_N\}} u(s) d\mu_a.$$

Dado que

$$\int_{[0,t) - \{t_1, \dots, t_N\}} u(s) d\mu_a = \int_{D - \{t_1, \dots, t_N\}} u(s) d\mu_a$$

y que además $\mu(D - \{t_1, \dots, t_N\}) = \mu_a(D - \{t_1, \dots, t_N\}) = \sum_{j=N+1}^{\infty} \mu(\{t_j\}) \leq \delta$, entonces

$$\int_{[0,t) - \{t_1, \dots, t_N\}} u(s) d\mu_a \leq \epsilon.$$

Reemplazando en la ecuación (3.3.8), obtenemos

$$w(t) \leq cK(t) + K(t)\epsilon + K(t) \int_{[0,t) - \{t_1, \dots, t_N\}} u(s) d\bar{\mu},$$

dado que $\bar{\mu}(\{t_1, \dots, t_N\}) = 0$, entonces

$$w(t) \leq cK(t) + K(t)\epsilon + K(t) \int_{[0,t)} u(s) d\bar{\mu}.$$

Cuando $\epsilon \rightarrow 0$, nos queda la siguiente desigualdad

$$u(t) \leq w(t) \leq cK(t) + K(t) \int_{[0,t)} u(s) d\bar{\mu},$$

y como $K(r)$ es creciente para todo $r \in [0, t]$ tenemos que

$$u(r) \leq w(r) \leq cK(t) + K(t) \int_{[0,r)} u(s) d\bar{\mu}.$$

Si llamamos $\eta(A) = K(t)\bar{\mu}(A)$, η es una medida continua al igual que $\bar{\mu}$ y la ecuación anterior se convierte en

$$u(r) \leq w(r) \leq C + \int_{[0,r)} u(s) d\eta,$$

tomando $C = cK(t)$. Luego, podemos aplicar el Lema 3.20 y por lo tanto

$$u(r) \leq Ce^{\eta([0,r])};$$

ahora volviendo a la medida $\bar{\mu}$ y reemplazando C , tenemos que para todo $r \leq t$

$$u(r) \leq cK(t)e^{K(t)\bar{\mu}([0,r])};$$

en particular, si tomamos $r = t$,

$$u(t) \leq cK(t)e^{K(t)\bar{\mu}([0,t])}.$$

□

3.3.2. Operador de Poincaré

Llamaremos φ_α a solución del problema de valores iniciales

$$\begin{cases} d\varphi = f(t, \varphi(t))d\mu \\ \varphi(0) = \alpha, \end{cases} \quad (3.3.9)$$

definida en 3.7. De aquí en adelante vamos a suponer que $f : [0, T] \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ está acotada, es decir $\|f\|_\infty < M$ y cumple con:

- (P-1) Para cada $x \in \mathbb{R}^n$, $f(t, x)$ μ -medible en la variable t y continua.
- (P-2) Para cada $t \in [0, T]$, $f(t, x)$ es continua y acotada en la variable x .
- (P-3) Existen a, b positivos tal que

$$|f(t, x)| \leq a|x| + b.$$

- (P-4) Existe $L \in \mathbb{R}$ tal que

$$|f(t, x) - f(t, y)| \leq L|x - y|.$$

Por el Teorema 3.8, para cada α existe una solución φ_α del problema de valores iniciales (3.3.9). Veamos qué propiedades tiene esta solución.

Proposición 3.25. *Sea φ_α solución de (3.3.9). Entonces $\varphi_\alpha \in L^\infty([0, T], \mathbb{R}^n)$, y además si $s \leq t$, vale que*

$$|\varphi_\alpha(t) - \varphi_\alpha(s)| \leq M\mu([s, t]).$$

Dem: Dado que φ_α es solución del problema (3.3.9), entonces por Definición 3.7 tenemos que

$$\varphi_\alpha(t) = \varphi_\alpha(0) + \int_{[0,t)} f(s, \varphi_\alpha(s)) d\mu,$$

y por la desigualdad triangular vale que

$$|\varphi_\alpha(t)| \leq |\varphi_\alpha(0)| + \int_{[0,t)} |f(s, \varphi_\alpha(s))| d\mu.$$

Luego por (P-3)

$$\begin{aligned} |\varphi_\alpha(t)| &\leq |\varphi_\alpha(0)| + \int_{[0,t)} (a|\varphi_\alpha(s)| + b) d\mu \\ &\leq |\varphi_\alpha(0)| + b\mu([0, T]) + a \int_{[0,t)} |\varphi_\alpha(s)| d\mu. \end{aligned}$$

Si llamamos $C = |\varphi_\alpha(0)| + b\mu([0, T])$ y $\nu = a\mu$, entonces

$$|\varphi_\alpha(t)| \leq C + \int_{[0, t)} |\varphi_\alpha(s)| d\nu,$$

aplicando el Teorema 3.24 obtenemos que para $t \in [0, T]$

$$|\varphi_\alpha(t)| \leq CK(T) \exp(K(T)a\bar{\mu}([0, T])) < \infty.$$

Tomando supremo sobre todo el intervalo $[0, T]$, tenemos que $\varphi_\alpha \in L^\infty([0, T], \mathbb{R}^n)$. Por otro lado, como $\|f\|_\infty \leq M$, para $s \leq t$ vale que

$$|\varphi_\alpha(t) - \varphi_\alpha(s)| \leq \int_{[s, t)} |f(r, \varphi_\alpha(r))| d\mu \leq M \mu([s, t)).$$

□

Corolario 3.26. *Sea φ_α solución de (3.3.9). Si $t_0 \in [0, T]$ cumple que $\mu(\{t_0\}) = 0$, entonces φ_α es continua en t_0 .*

Dem. Como

$$0 = \mu(\{t_0\}) = \mu\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} \left[t_0 - \frac{1}{n}, t_0 + \frac{1}{n}\right]\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu\left(\left[t_0 - \frac{1}{n}, t_0 + \frac{1}{n}\right]\right)$$

Para todo $\epsilon > 0$ existe $N \in \mathbb{N}$ tal que si $n > N$, entonces

$$\mu\left(\left[t_0 - \frac{1}{n}, t_0 + \frac{1}{n}\right]\right) < \epsilon/M.$$

Sea $\delta > 0$ tal que $[t_0 - \delta, t_0 + \delta] \subset [t_0 - \frac{1}{n}, t_0 + \frac{1}{n}]$, entonces por la proposición 3.25, para $t \in [t_0 - \delta, t_0 + \delta]$ vale que

$$|\varphi_\alpha(t) - \varphi_\alpha(t_0)| \leq M\mu\left(\left[t_0 - \frac{1}{n}, t_0 + \frac{1}{n}\right]\right) < \epsilon$$

□

El siguiente teorema muestra que las soluciones de (3.3.9) están definidas en todo $[0, T]$.

Teorema 3.27 (Dominio de la solución). *Sea μ una medida de Borel finita. Si $f : [0, T] \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ cumple con las condiciones (P-1) a (P-4), entonces la solución del problema (3.3.9) está definida en todo el intervalo $[0, T]$.*

Dem. Supongamos que la solución máxima está definida en el intervalo $[0, t_1]$, donde $t_1 < T$. Entonces por el Teorema 3.11 se debe cumplir alguna de las dos condiciones:

A) $\forall K \subseteq [0, T] \times \mathbb{R}^n$ existe $t_2 \in [0, t_1)$ tal que $(t, \varphi(t)) \notin K \forall t \in (t_2, t_1)$.

B) Existe $x_1 = \lim_{t \rightarrow t_1^-} \varphi(t)$, $(t_1, x_1) \in [0, T] \times \mathbb{R}^n$ y

$$(t_1, \varphi(t_1) + f(t_1, \varphi(t_1))\mu(\{t_1\})) \notin [0, T] \times \mathbb{R}^n.$$

Si la condición (A) es verdadera, entonces para $\epsilon \in \left(0, \frac{T-t_1}{2}\right)$ definimos el conjunto $K_\epsilon = [0, t_1 + \epsilon] \times B(0, R)$ donde $\|\varphi\|_\infty \leq R$. Como K_ϵ es cerrado y acotado, entonces K_ϵ está compactamente incluido en $[0, T] \times \mathbb{R}^n$. Luego existe $t_2 \in [0, t_1)$ tal que $(t, \varphi(t)) \notin K_\epsilon$ para todo $t \in (t_2, t_1)$. Como $\varphi(t) \in B(0, R)$, la única manera de que $(t, \varphi(t)) \notin K_\epsilon$ es que $t > t_1 + \epsilon$, lo cual es un absurdo. Por otro lado, es inmediato que (B) es falso, porque si no lo fuese, resultaría que $\varphi(t_1) + f(t_1, \varphi(t_1))\mu(\{t_1\}) \notin \mathbb{R}^n$. Luego el intervalo donde está definida φ es $[0, T]$. \square

Definición 3.28. Llamaremos operador de Poincaré al operador $P : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ tal que para cada valor inicial α , $P(\alpha) = \varphi_\alpha(T)$, donde φ_α es solución de (3.3.9).

Lema 3.29. El operador de Poincaré es continuo.

Dem. Sean φ_α y φ_β dos soluciones del problema (3.3.9). Como f es Lipschitz

$$\begin{aligned} |\varphi_\alpha(t) - \varphi_\beta(t)| &\leq |\alpha - \beta| + \int_{[0,t)} |f(r, \varphi_\alpha(r)) - f(r, \varphi_\beta(r))| d|\mu| \\ &\leq |\alpha - \beta| + L \int_{[0,t)} |\varphi_\alpha(r) - \varphi_\beta(r)| d|\mu|. \end{aligned}$$

Si aplicamos el Teorema 3.24 tomando $u(t) = |\varphi_\alpha(t) - \varphi_\beta(t)|$, $c = |\alpha - \beta|$ y $\nu = L|\mu|$, conseguimos

$$|\varphi_\alpha(t) - \varphi_\beta(t)| \leq K(t)|\alpha - \beta| e^{K(t)L|\bar{\mu}|([t_0, t))}.$$

Luego, si evaluamos en $t = T$ y llamamos $K = K(T) = \prod_{\tau \in D} \mu(\{\tau\}) < \infty$.

$$|P(\alpha) - P(\beta)| = |\varphi_\alpha(T) - \varphi_\beta(T)|_1 \leq K|\alpha - \beta|_1 e^{KL|\bar{\mu}|([0, T))} \rightarrow 0$$

cuando $|\alpha - \beta| \rightarrow 0$. \square

Teorema 3.30. Sea $R > 0$ y f satisface las condiciones (P-1) a (P-4), 3.10 para $B(0, R)$ y además que

$$f(t, u) \cdot u < 0 \text{ para todo } (t, u) \text{ donde } |u| = R \text{ y } \mu(\{t\}) = 0. \quad (3.3.10)$$

Entonces el operador de Poincaré definido en 3.28 cumple que $P(\overline{B(0, R)}) \subset \overline{B(0, R)}$.

Dem. Sea φ_α la solución a 3.3.9 y sea $A = \{t \in [0, T] \mid \varphi_\alpha(s) \in \overline{B(0, R)}, \forall s \in [0, t]\}$, veamos que el conjunto A es simultáneamente abierto y cerrado relativo al intervalo $[0, T]$, y como $[0, T]$ es conexo, entonces $A = [0, T]$.

Veamos primero que A es un conjunto cerrado respecto al $[0, T]$. Para ello, sea t_n una sucesión de A que converge a t , veamos que $t \in A$. Si para algún n , $t_n \geq t$ entonces $\forall s \in [0, t] \subset [0, t_n]$ vale que $\varphi_\alpha(s) \in \overline{B(0, R)}$, por lo tanto en $t \in A$. Si por el contrario $\forall n$ tenemos que $t_n < t$, como φ_α es continua a izquierda, entonces $\lim_{n \rightarrow \infty} \varphi_\alpha(t_n) = \varphi_\alpha(t)$ y como cada $\varphi_\alpha(t_n) \in \overline{B(0, R)}$ es inmediato que $\varphi_\alpha(t) \in \overline{B(0, R)}$, es decir $t \in A$. Por lo tanto, A es cerrado.

Si A es un conjunto abierto relativo al $[0, T]$, entonces $[0, T] \setminus A$ es cerrado, es decir para toda sucesión $\{t_n\} \subset [0, T] \setminus A$ si $t_n \rightarrow t$ entonces $t \in [0, T] \setminus A$. Por lo tanto si suponemos que A no es abierto relativo al intervalo $[0, T]$, entonces $\exists t_0 \in A$ y $\{t_n\} \not\subset A$ tal que $t_n \rightarrow t_0$. Podemos asegurar que si $t > t_0$ entonces $t \notin A$, pues existe n_0 tal que $t_0 < t_{n_0} < t$ y como tengo que $t_{n_0} \notin A$, en particular $|\varphi_\alpha(t_{n_0})| > R$.

Veamos que como $t_0 \in A$, entonces $\varphi_\alpha(t_0) \in B(0, R)$ o $\varphi_\alpha(t_0) \in \partial B(0, R)$, y siempre existe $t > t_0$ tal que $t \in A$.

- Supongamos que $\varphi_\alpha(t_0) \in B(0, R)$.

En el problema (3.3.9) podemos tomar como condición inicial $\varphi(0) = \varphi_\alpha(t_0) = \beta \in B(0, R)$, entonces por el Teorema 3.8 existe una solución, que notaremos φ_β . Luego, tenemos que para todo $t \in [0, \delta)$ el par $(t, \varphi_\beta(t)) \in \Omega$, donde Ω es un entorno de $[0, T] \times B(0, R)$. Ahora podemos extender a φ_α de la siguiente manera

$$\varphi_\alpha(t) = \begin{cases} \varphi_\alpha(t) & \text{si } t \in [0, t_0) \\ \varphi_\beta(t - t_0) & \text{si } t \in [t_0, t_0 + \delta) \end{cases}$$

Por lo tanto para todo $t \in [t_0, t_0 + \delta)$ vale que $|\varphi_\alpha(t)| = |\varphi_\beta(t - t_0)| \leq R$. Es decir existe $t > t_0$ tal que $t \in A$.

- Supongamos que $\varphi(t_0) \in \partial B(0, R)$ y $\mu(\{t_0\}) \neq 0$.

Por (3.10) $x_1 = \varphi(t_0) + f(t, \varphi(t_0))\mu(\{t_0\}) \in B(0, R)$, y tomando la medida $\hat{\mu} = \mu - \mu(\{t_0\})\delta_{t_0}$, es claro que $\hat{\mu}(\{t_0\}) = 0$, puedo aplicar el Teorema 3.8 para la condición inicial $\varphi(0) = x_1$, pero con la medida $\hat{\mu}$. Luego, existe $\delta > 0$ y φ_{x_1} tal que $|\varphi_{x_1}(t)| \leq R$ para todo $t \in [0, 0 + \delta)$. Ahora puedo extender la solución φ_α al intervalo $[0, t_0 + \delta)$ de la siguiente manera

$$\varphi_\alpha(t) = \begin{cases} \varphi_\alpha(t) & \text{si } t \in [0, t_0] \\ \varphi_{x_1}(t - t_0) & \text{si } t \in (t_0, t_0 + \delta) \end{cases}$$

Por lo tanto existe $t > t_0$ tal que $|\varphi_\alpha(t)| < R$, es decir vale que $t \in A$.

- Supongamos $\varphi(t_0) \in \partial B(0, R)$ y $\mu(\{t_0\}) = 0$

De (3.3.10) existe $b > 0$ tal que $f(t_0, \varphi(t_0)) \cdot \varphi(t_0) < -b$.

Por (3.2.1) y Corolario 3.26, para $\epsilon = \frac{b}{3RL}$ existe $\delta_1 > 0$ tal que si $t \in [t_0, t_0 + \delta_1)$ entonces

$$\begin{aligned} \int_{[t_0, t)} f(s, \varphi_\alpha(s)) - f(s, \varphi_\alpha(t_0)) d\mu &\leq \int_{[t_0, t)} |\varphi_\alpha(s)\varphi_\alpha(t_0)| d\mu \\ &\leq \frac{b}{3R}\mu((t_0, t)). \end{aligned} \quad (3.3.11)$$

Además, como f es continua en t_0 $\exists \delta_2 > 0$ tal que si $s \in [t_0, t_0 + \delta_2)$, entonces

$$|f(s, \varphi_\alpha(t_0)) - f(t_0, \varphi_\alpha(t_0))| \leq \frac{b}{3R}. \quad (3.3.12)$$

Para todo $t \in [t_0, t_0 + \delta)$, donde $\delta = \min\{\delta_1, \delta_2\}$, usando (3.3.11) y (3.3.12) tenemos que

$$\begin{aligned}\varphi_\alpha(t) - \varphi_\alpha(t_0) &= \int_{(t_0, t)} [f(s, \varphi_\alpha(s)) - f(s, \varphi_\alpha(t_0))] d\mu \\ &+ \int_{(t_0, t)} [f(s, \varphi_\alpha(t_0)) - f(t_0, \varphi_\alpha(t_0))] d\mu \\ &+ \int_{(t_0, t)} f(t_0, \varphi_\alpha(t_0)) d\mu, \\ &\leq \frac{b}{3R} \mu((t_0, t)) + \int_{(t_0, t)} \frac{b}{3R} d\mu + \int_{(t_0, t)} f(t_0, \varphi_\alpha(t_0)) d\mu.\end{aligned}$$

Si multiplicamos por el vector $\varphi_\alpha(t_0)$ y como $|\varphi_\alpha(t_0)| = R$, entonces

$$\begin{aligned}[\varphi_\alpha(t) - \varphi_\alpha(t_0)] \cdot \varphi_\alpha(t_0) &\leq \varphi_\alpha(t_0) \cdot \frac{2b}{3R} \mu((t_0, t)) \\ &+ \int_{(t_0, t)} f(t_0, \varphi_\alpha(t_0)) \cdot \varphi_\alpha(t_0) d\mu \\ &\leq \frac{2b}{3} \mu((t_0, t)) - b \mu((t_0, t)) = -\frac{b}{3} \mu((t_0, t)).\end{aligned}$$

Luego por la Proposición?? (3.25)

$$\begin{aligned}|\varphi_\alpha(t)|^2 &= |\varphi_\alpha(t_0)|^2 + 2[\varphi_\alpha(t) - \varphi_\alpha(t_0)] \cdot \varphi_\alpha(t_0) + |\varphi_\alpha(t) - \varphi_\alpha(t_0)|^2 \\ &\leq R^2 - \frac{2b}{3} \mu((t_0, t)) + M^2 \mu((t_0, t))^2.\end{aligned}$$

O equivalentemente

$$|\varphi_\alpha(t)|^2 - R^2 \leq \mu((t_0, t)) \left[M^2 \mu((t_0, t)) - \frac{2b}{3} \right]. \quad (3.3.13)$$

El término de la derecha es una expresión cuadrática respecto a $\mu((t_0, t))$, y tiene como raíces t_0 y otro valor a derecha de t_0 , es decir existe $t_1 > t_0$ tal que $|\varphi_\alpha(t_1)|^2 - R^2 \leq 0$, por lo tanto $t_1 \in A$.

Por lo tanto, mostramos que existe $t_1 > t_0$ tal que $t \in A$, lo cual contradice que no sea abierto relativo al $[0, T]$. Finalmente, si A es abierto y cerrado relativo al intervalo $[0, T]$, entonces $A = [0, T]$.

Luego, para cualquier $\alpha \in \overline{B(0, R)}$,

$$P(\alpha) = \varphi_\alpha(T) \in \overline{B(0, R)}.$$

□

Teorema 3.31 (Teorema de Brouwer). Sea $B(0, R)$ una bola de \mathbb{R}^n y sea $P : \overline{B(0, R)} \rightarrow \overline{B(0, R)}$ continua. Entonces existe $x \in \overline{B(0, R)}$ tal que $P(x) = x$.

Teorema 3.32. Sea μ una medida de Borel finita, y sea $f : [0, T] \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ una función que cumple con las condiciones (P-1) a (P-4). Además, existe una bola $B(0, R)$ tal que si $x \in \overline{B(0, R)}$, entonces $x + f(t, x)\mu(\{t\}) \in \overline{B(0, R)}$ para todo $t \in [0, T]$, y

$$f(t, x) \cdot x < 0 \text{ para todos } |x| = R \text{ y } \mu(\{t\}) = 0.$$

Entonces el problema

$$\begin{cases} d(\varphi) = f(t, \varphi(t))d\mu \\ \varphi(0) = \varphi(T) \end{cases} \quad (PP)$$

tiene al menos una solución.

Dem. Por el Teorema 3.27 y el Lema 3.29, el operador P está bien definido y es continuo. Luego, por el Teorema 3.30 se tiene que $P\left(\overline{B(0, R)}\right) \subset \overline{B(0, R)}$, y ahora aplicando el Teorema de Brouwer se llega a que existe una solución φ al problema (3.3.9) tal que $\varphi(T) = \varphi(0)$. \square

Ejemplo 1. Sea $u : [0, T] \rightarrow \mathbb{R}$, y sean $g_{1,2} : [0, T] \rightarrow \mathbb{R}^n$ funciones suficientemente buenas, definimos el siguiente problema impulsivo

$$\begin{cases} u'' = g_1(t, u, u')d\lambda + g_2(t, u, u') \sum_{i=1}^r d\delta_{t_i} \\ u'(0) = u'(T) \\ u(0) = u(T), \end{cases} \quad (3.3.14)$$

donde $t_i \in (0, T)$ y δ_{t_i} es la medida delta de Dirac concentrada en t_i . Veamos como podemos aplicar el teorema 3.32 a este tipo de problemas.

Si llamamos $u' = v$ podemos transformar el problema (3.3.14) en un sistema de ecuaciones

$$\begin{cases} (u', v') = (v, g_1(t, u, v)) d\lambda + \sum_{i=1}^r (0, g_2(t, u, v)) d\delta_{t_i} \\ (u(0), v(0)) = (u(T), v(T)). \end{cases}$$

A este sistema de ecuaciones lo podemos escribir de manera vectorial, tomando $\varphi = (u, v)$, $G_1(t, \varphi) = (v, g_1(t, u, v))$ y $G_2(t, \varphi) = (0, g_2(t, u, v))$.

$$\begin{cases} \varphi' = G_1(t, \varphi)d\lambda + G_2(t, \varphi) \sum_{i=1}^r d\delta_{t_i} \\ \varphi(0) = \varphi(T). \end{cases}$$

Si llamamos $F(t, \varphi) = (G_1(t, \varphi)\chi_{[0, T] - \{t_1, \dots, t_r\}} + G_2(t, \varphi)\chi_{\{t_1, \dots, t_r\}})$ y tomando $d\mu = d\left(\lambda + \sum_{i=1}^r \delta_{t_i}\right)$, entonces la ecuación vectorial se transforma en la del Teorema 3.32.

Capítulo 4

Experimentos Numéricos

En este capítulo vamos a desarrollar un método numérico para hallar soluciones a MDE mediante el método shooting. Primero haremos una descripción del método y luego analizaremos la convergencia del mismo. En apéndice A mostraremos el código que utilizamos, escrito en lenguaje Python.

4.1. Método Numérico

Como ya dijimos, el método shooting consiste en resolver la MDE

$$\begin{cases} d\varphi = f(t, \varphi) d\mu & \text{para } t \in [0, T] \\ \varphi(0) = \alpha, \end{cases} \quad (P)$$

para varios valores de α y ver para cuál se cumple que $\alpha = \varphi(T)$.

De acuerdo a la Definición 3.7, una solución de (P) es una función $\varphi \in BV([0, T], \mathbb{R}^n)$ y continua izquierda tal que

$$\varphi(t) = \alpha + \int_{[0, t)} f(s, \varphi(s)) d\mu. \quad (4.1.1)$$

El procedimiento consta de dos partes. En la primera se aproxima la solución al problema de valores iniciales P mediante iteraciones sucesivas de Picard [22], las cuales se generan de la siguiente manera

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= \alpha \\ \varphi_k(t) &= \alpha + \int_{0, t} f(s, \varphi_{k-1}(s)) d\mu. \end{aligned}$$

En [5] los autores muestran que las iteraciones de Picard convergen a la solución en un caso más general, en el Teorema 4.4 mostraremos la convergencia en nuestro caso particular y además veremos con qué velocidad converge.

La segunda parte consiste en aproximar el término de la derecha de (4.1.1), el cual es una integral en el sentido de Lebesgue-Stieljes. Para aproximar la integral de (L-S) usaremos sumas de Riemann-Stieljes, de la siguiente manera

$$\int_{[0, t)} f(s, \varphi(s)) d\mu \approx \sum_{k=1}^{n-1} f(t_k, \varphi(t_k)) \mu([t_k, t_{k+1})), \quad (4.1.2)$$

donde los puntos $\{t_k\}$ son una partición del intervalo $[0, t]$. Cabe aclarar que la función que estamos integrando no es necesariamente integrable en el sentido de la integral de Riemann-Stieljes (R-S). Para que la integral de (R-S) exista es suficiente que la función sea continua [23] o el conjunto de discontinuidades tenga medida cero con respecto a la medida μ [14], lo cual por lo general no pasa. En el Teorema 4.1 veremos que cuando evaluamos la función en el miembro de la izquierda de (4.1.2), la suma de (R-S) efectivamente converge a la integral de (L-S).

Teorema 4.1. *Sea $F : [0, T] \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ continua izquierda y sea μ una medida de Borel positiva y finita. Supongamos que existe $M > 0$ tal que $|F| < M$. Entonces para todo $\epsilon > 0$ y para cualquier partición del intervalo $[0, T]$, $P_n = \{0 = t_1, t_2, \dots, t_n = T\}$, existe $\delta > 0$ tal que*

$$\left| \int_{[0, T)} F(s) d\mu - \sum_{k=1}^{n-1} F(t_k) \mu([t_k, t_{k+1})) \right| < \epsilon,$$

siempre que $\max\{t_{k+1} - t_k\} < \delta$. *Así está bien?*

Dem. Supongamos que la afirmación es falsa, entonces para todo $n \in \mathbb{N}$ existe una partición $P_k^n = \{0 = t_1^n, t_2^n, \dots, t_k^n = T\}$ del intervalo $[0, T]$ tal que $\max\{t_{k+1} - t_k\} < 1/n$ y

$$\left| \int_{[0, T)} F(s) d\mu - \sum_{k=1}^{n-1} F(t_k) \mu([t_k, t_{k+1})) \right| > \epsilon. \quad (4.1.3)$$

Si armamos la función simple

$$\Phi(t) = \sum_{k=1}^{n-1} F(t_k) \chi_{[t_k^n, t_{k+1}^n)}(t)$$

para cada $t \in [0, T]$ existe un intervalo de la partición P_k^n tal que $t \in [t_k, t_{k+1})$ y además $t - 1/n < t_k^n$, por lo tanto t_k^n tiende a t por izquierda cuando $n \rightarrow \infty$. Como F es continua a izquierda, tenemos que

$$|\Phi(t) - F(t)| = \left| \sum_{k=1}^{n-1} [F(t_k) - F(t)] \chi_{[t_k^n, t_{k+1}^n)}(t) \right| \leq |F(t_k^n) - F(t)| \rightarrow 0$$

Luego, como $|F| < M$ entonces $|\Phi| < M$ y por el Teorema de la convergencia mayorada de Lebesgue

$$\begin{aligned} \int_{[0, T)} F(t) d\mu &= \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{[0, T)} \Phi(t) d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{[0, T)} \sum_{k=1}^{n-1} F(t_k) \chi_{[t_k^n, t_{k+1}^n)}(t) d\mu \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{n-1} F(t_k) \mu([t_k^n, t_{k+1}^n)). \end{aligned}$$

Llegamos a un absurdo, pues se contradice (4.1.3) □

Antes de ver el caso particular de las iteraciones de Picard, vamos a enunciar el Teorema de punto fijo de Banach cuya demostración se puede ver en [1].

Teorema 4.2 (Punto Fijo de Banach). *Sea \mathcal{X} un espacio métrico completo, $T : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{X}$ y $\exists K < 1$ tal que*

$$d(T[x], T[y]) \leq Kd(x, y)$$

para todo $x, y \in \mathcal{X}$. Entonces T tiene un único punto fijo \tilde{x} . Además, si $x_0 \in \mathcal{X}$ es un punto arbitrario y $\{x_n\}_n^\infty = 0$, la sucesión recursiva definida como $x_n = T(x_{n-1})$, entonces $\tilde{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.

El siguiente corolario es muy útil para definir las iteraciones de Picard.

Corolario 4.3. *Sea \mathcal{X} un espacio métrico completo. Definimos $T^n = T \circ T \circ \dots \circ T$ (n -veces) y además $\exists K < 1$ tal que*

$$d(T^n[x], T^n[y]) \leq Kd(x, y)$$

para todo $x, y \in \mathcal{X}$ y para todo n . Entonces T tiene un único punto fijo en \mathcal{X} .

Teorema 4.4. *Sea μ una medida de Borel finita y positiva en $[0, T]$, y sea $f : [0, T] \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ continua y que satisface 3.2.1, entonces el problema (P) tiene una única solución, es decir existe una única función $\varphi \in BV([0, T], \mathbb{R}^n)$, continua a izquierda tal que*

$$\varphi(t) = \alpha + \int_{[0, t)} f(s, \varphi(s)) d\mu.$$

Dem. Sea

$$\mathcal{X} = BV_\alpha([0, T], \mathbb{R}^n) \cap \{\varphi : [0, T] \rightarrow \mathbb{R}^n \mid \varphi \text{ es continua a izquierda}\}.$$

Definimos el operador T , como

$$T[\varphi] = \alpha + \int_{[0, t)} f(s, \varphi(s)) d\mu. \quad (4.1.4)$$

Entonces, un punto fijo de T será la solución que estamos buscando. Veamos las siguientes afirmaciones.

1. **\mathcal{X} es completo con la métrica d .**

En la proposición 2.4, vimos que $(BV_\alpha([0, T], \mathbb{R}^n), d)$ es completo. Veamos que \mathcal{X} es un subconjunto cerrado de $BV_\alpha([0, T], \mathbb{R}^n)$ y por lo tanto completo. Sea $\{\varphi_n\} \subset \mathcal{X}$ tal que $d(\varphi_n, \varphi_0) \rightarrow 0$, entonces $\varphi_0 \in BV_\alpha([0, T], \mathbb{R}^n)$. Además, para cualquier $\epsilon > 0$ existe n_0 , tal que $\forall n > n_0$ vale que $d(\varphi_0, \varphi_n) < \epsilon/2$. Luego, para cualquier $t \in [0, T]$, tenemos que

$$\begin{aligned} |\varphi_0(t - 1/n) - \varphi_0(t)| &\leq |\varphi_0(t - 1/n) - \varphi_n(t - 1/n)| \\ &\quad + |\varphi_n(t - 1/n) - \varphi_n(t)| + |\varphi_n(t) - \varphi_0(t)| \\ &\leq d(\varphi_0, \varphi_n) + |\varphi_n(t - 1/n) - \varphi_n(t)| + d(\varphi_n, \varphi_0) \\ &\leq \epsilon + |\varphi_n(t - 1/n) - \varphi_n(t)|. \end{aligned}$$

Como φ_n es continua a izquierda, podemos concluir que $\varphi_0 \in \mathcal{X}$. Luego \mathcal{X} es un subconjunto cerrado de un espacio completo, por lo tanto también es completo.

2. El operador T está bien definido.

Si $\varphi \in \mathcal{X}$, entonces para cualquier $t \in [0, T]$ vale que

$$|\varphi(t)| \leq |\varphi(0)| + V(\varphi, [0, T]), \quad (4.1.5)$$

es decir φ está acotada. Por otro lado, como f es Lipschitz

$$\begin{aligned} |f(t, x)| &\leq |f(t, x) - f(t, 0)| + |f(t, 0)| \\ &\leq L|x| + |f(t, 0)|, \end{aligned} \quad (4.1.6)$$

y además, dado que f es continua existe $a > 0$ tal que $|f(t, 0)| < a$ para todo $t \in [0, T]$. Entonces por (4.1.5) y (4.1.6) para todo $t \in [0, T]$ verifica que

$$|f(t, \varphi(t))| \leq L|\varphi(t)| + |f(t, 0)| \leq L(|\varphi(0)| + V(\varphi, [0, T])) + a.$$

Si llamamos $A_\varphi = L(|\varphi(0)| + V(\varphi, [0, T])) + a$, entonces

$$\int_{[0, t)} f(s, \varphi(s)) d\mu \leq A_\varphi \mu([0, t)) < \infty, \quad (4.1.7)$$

es decir, $T[\varphi] < \infty$ para toda $\varphi \in \mathcal{X}$.

3. Sea $\varphi \in \mathcal{X}$, entonces $T[\varphi] \in \mathcal{X}$.

Primero observemos que $T[\varphi] \in BV_\alpha([0, T], \mathbb{R}^n)$. Sea $P_n = \{t_k\}_{k=1}^n$ una partición del intervalo $[0, T]$, entonces usando (4.1.7) y que μ es positiva,

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{n-1} |T[\varphi](t_{k+1}) - T[\varphi](t_k)| &\leq \sum_{k=1}^{n-1} \int_{[t_k, t_{k+1})} |f(s, \varphi(s))| d\mu, \\ &\leq A_\varphi \mu([0, T]) < \infty. \end{aligned}$$

Como el miembro de la derecha no depende de la partición, cuando tomamos supremo sobre todas las particiones del intervalo $[0, T]$, tenemos que

$$V(T[\varphi], [0, T]) < \infty.$$

Además $T[\varphi](0) = \alpha$, por lo tanto $T[\varphi] \in BV_\alpha([0, T], \mathbb{R}^n)$.

Por último, mostremos que $T[\varphi]$ es continua a izquierda. Sea $t_n \rightarrow t^-$, entonces como $[t_{n+1}, t) \subset [t_n, t)$ por [11, 3.28]

qué es (3.28) en la referencia? Ecuación, Teorema, Lema?no dice..

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mu([t_n, t)) = \mu\left(\bigcap_{n=1}^{\infty} [t_n, t)\right) = \mu(\emptyset) = 0.$$

Luego por (4.1.7)

$$\begin{aligned} \left| \int_{[0, t_n)} f(s, \varphi(s)) d\mu - \int_{[0, t)} f(s, \varphi(s)) d\mu \right| &\leq \int_{[t_n, t)} |f(s, \varphi(s))| d\mu \\ &\leq A_\varphi \mu([t_n, t)) \rightarrow 0, \end{aligned}$$

es decir $T[\varphi](t_n) \rightarrow T[\varphi](t)$.

4. Sea $T^n = T \circ T \circ \dots \circ T$ (n -veces). Mostremos que para cualquier $\varphi_1, \varphi_2 \in \mathcal{X}$, $\exists L > 0$ tal que

$$d(T^n[\varphi_1], T^n[\varphi_2]) \leq \frac{L^n [\mu([0, T])]^n}{n!} d(\varphi_1, \varphi_2), \quad (4.1.8)$$

Para $n = 0$ es claro que (4.1.8) se verifica pues

$$\begin{aligned} d(T^0[\varphi_1], T^0[\varphi_2]) &= V(T^0[\varphi_1] - T^0[\varphi_2], [0, T]) = V(\varphi_1 - \varphi_2, [0, T]) \\ &= d(\varphi_1, \varphi_2). \end{aligned}$$

Supongamos válida la desigualdad (4.1.8) para n y probemos que vale para $n+1$. Sea $\{t_i\}_{i=1}^k$ una partición del intervalo $[0, T]$. Como f es Lipschitz, entonces existe $L > 0$ tal que

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{k-1} |T^{n+1}[\varphi_1](t_{i+1}) - T^{n+1}[\varphi_2](t_{i+1}) - T^{n+1}[\varphi_1](t_i) + T^{n+1}[\varphi_2](t_i)| \\ &\leq \sum_{i=1}^{k-1} \int_{[t_i, t_{i+1})} |f(s, T^n[\varphi_1](s)) - f(s, T^n[\varphi_2](s))| d\mu \\ &\leq \sum_{i=1}^{k-1} L \int_{[t_i, t_{i+1})} |T^n[\varphi_1](s) - T^n[\varphi_2](s)| d\mu \\ &\leq L \int_{[0, T]} |T^n[\varphi_1](s) - T^n[\varphi_2](s)| d\mu. \end{aligned}$$

Además, por el lema 2.3 se verifica que

$$|T^n[\varphi_1](s) - T^n[\varphi_2](s)| \leq d(T^n[\varphi_1], T^n[\varphi_2]),$$

y como supusimos que la desigualdad (4.1.8) vale para n , entonces

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{k-1} |T^{n+1}[\varphi_1](t_{i+1}) - T^{n+1}[\varphi_2](t_{i+1}) - T^{n+1}[\varphi_1](t_i) + T^{n+1}[\varphi_2](t_i)| \\ &\leq L \int_{[0, T]} |T^n[\varphi_1](s) - T^n[\varphi_2](s)| d\mu \leq L \int_{[0, T]} d(T^n[\varphi_1], T^n[\varphi_2]) d\mu \\ &\leq \frac{L^{n+1} d(\varphi_1, \varphi_2)}{n!} \int_{[0, T]} [\mu([0, s))]^n d\mu. \end{aligned}$$

Luego, si tomamos supremo sobre todas las particiones del intervalo $[0, T]$ obtenemos que

$$d(T^{n+1}[\varphi_1], T^{n+1}[\varphi_2]) \leq \frac{L^{n+1} d(\varphi_1, \varphi_2)}{n!} \int_{[0, T]} [\mu([0, s))]^n d\mu.$$

Aplicando la observación 3.14, tomando $F = \frac{x^{n+1}}{n+1}$ y $g(s) = \mu([0, s])$, tenemos que

$$\begin{aligned} d(T^{n+1}[\varphi_1], T^{n+1}[\varphi_2]) &\leq \frac{L^{n+1} d(\varphi_1, \varphi_2)}{n!} \frac{[\mu([0, T])]^{n+1}}{n+1} \\ &\leq \frac{L^{n+1} [\mu([0, T])]^{n+1}}{(n+1)!} d(\varphi_1, \varphi_2). \end{aligned}$$

Luego T cumple con las hipótesis del corolario 4.3 y existe $\varphi \in \mathcal{X}$ tal que $T[\varphi] = \varphi$. Es decir, existe $\varphi \in BV([0, T], \mathbb{R}^n)$, continua a izquierda tal que $\varphi(0) = \alpha$ y para todo $t \in [0, T]$ vale que

$$\varphi(t) = \alpha \int_{[0, t)} f(s, \varphi(s)) d\mu.$$

□

Corolario 4.5 (Velocidad de convergencia). *Si estamos en las condiciones del Teorema 4.4 y φ es un punto fijo de T , definido como (4.1.4). Entonces para cualquier $\varphi_1 \in BV_\alpha([0, T], \mathbb{R}^n)$ y continua a izquierda, vale que*

$$|T^n[\varphi_1](t) - \varphi(t)| \leq \frac{(L\mu([0, T]))^n}{n!} d(\varphi_1, \varphi), \quad (4.1.9)$$

para todo $t \in [0, T]$.

Dem. La desigualdad se deduce del Teorema 4.4 y del Lema 2.3. □

4.2. Simulaciones

Aplicamos el método shooting para problemas como los descriptos en el ejemplo 1. En particular, queríamos

en pasado?...aunque se haya hablado del tema en la intro, si presenta a continuación el sistema...convendría escribir en presente o futuro: queremos/querremos

hallar soluciones periódicas para la ecuación de un péndulo forzado sin rozamiento, donde la fuerza externa que actúa es una fuerza impulsiva.

Algo para presentar lo que sigue??? : (dos puntos) en lugar del . (punto seguido), ó cambiar el punto seguido por " , como/ del estilo de"

$$\begin{cases} u''(t) = -\text{sen}(u(t)) + \sum_{i=1}^r d\delta_{t_i} & \text{con } t \in [0, 4\pi] \\ u'(0) = u'(4\pi) \\ u(0) = u(4\pi). \end{cases} \quad (4.2.1)$$

Si $u' = v$ y llamando $\varphi = (u, v)$, entonces una solución de (4.2.1) es

$$\varphi(t) = \alpha + \int_0^t (v, -\text{sen}(u)) ds + \int_{[0, t)} (0, 1) \sum_{i=1}^r d\delta_{t_i}.$$

Tomamos los valores de $\alpha = (u(0), v(0))$ dentro de una malla de valores comprendida entre $[-\pi, \pi] \times [-2, 2]$ con un espesor de 0.02. Para cada valor de α encontramos la solución al problema de los valores iniciales y calculamos el error como $\|\alpha - \varphi(4\pi)\|$. Para desechar valores muy grande del error y acentuar los valores cercanos a 0, decidimos definir el error como

$$\text{Error} = \ln(1 + \|\alpha - \varphi(4\pi)\|^{0.1}).$$

A estos valores de error le asignamos una escala de colores para determinar gráficamente donde se encontraba el error. Se utilizó el lenguaje Python para programar el experimento, se

utilizaron emplearon/usaron

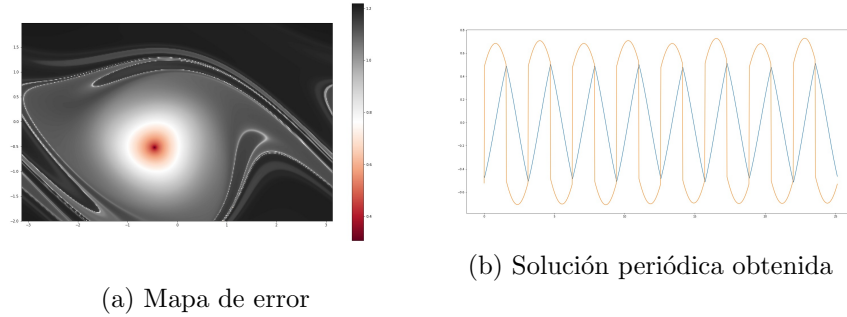


Figura 4.1

la librerías [13], [15]

El gráfico obtenido se ve en la figura 4.1a.

Comentarios para todo el trabajo:

En gral, en libros y papers, cuando se menciona una definición, proposición, teorema, lema, etc PROPIO, suele escribirse con mayúscula. Por ejemplo: Teorema 3.2, Definición 1.3.

Es una cuestión de gustos, pero esa escritura sirve para dar relevancia a tu trabajo (como poner un nombre propio) y también actúa como un GPS cuando se está leyendo (la mayúscula llama la atención y permite reubicarse fácilmente en el texto).

Otra cuestión:

En los resultados/definiciones/etc. propios, se usan mucho los verbos cumplir y valer.

Para que el discurso quede un poco más variado, podrían incorporarse otros verbos como verificar, satisfacer o algún otro sinónimo.

Apéndice A

Método Shooting

Aca iria el codigo

Glosario

- σ -álgebra, 17
 - Borel, 17
- compactamente incluido, 23
- condiciones de
 - teletransportación, 33
- descomposición de Jordan, 23
- desigualdad de Gronwall, 44
- fuerza impulsiva, 14
- impulso, 13
- localmente lipschits, 32
- MDE, 13, 32
- medida
 - absolutamente continua, 22
 - continua, 23
 - exterior, 20
 - Lebesgue-Stieltjes, 20
 - mutuamente singulares, 22
 - vectorial, 29
- medida con signo, 22
- operador de Poincaré, 49
- operador de Poíncare, 15
- premedida, 20
- punto de discontinuidad, 25
- solución máxima, 33
- Teorema de Cambio de Variables, 33
- variación, 18
 - acotada, 18
- variación negativa, 23
- variación positiva, 23

Indice de Símbolos

$A \setminus B$, 17	$\bar{\mu}$, 44	μ_u , 20
A_φ , 56	δ_{t_0} , 14	μ_0 , 20
$B(0, R)$, 33	$\ u\ _{L^\infty(\mu)}$, 24	\bar{u} , 21
$BV([0, T], \mathbb{R})$, 18	$\ u\ _{L^p(\mu)}$, 23	\perp , 22
$BV_\alpha([0, T], \mathbb{R}^n)$, 18	\ll , 22	$ x $, 17
$C([0, T])$, 17	\mathcal{A} , 20	$ x _1$, 17
D , 25	\mathcal{E} , 21	$ \mu $, 23
$K(t)$, 44	$\mathcal{B}([a, b])$, 21	d , 18
$L^\infty([0, T], \mu)$, 24	$\mathcal{B}([a, b])$, 17	$d\lambda$, 15
$L^p([0, T], \mu)$, 23	$\mathcal{B}(\mathcal{X})$, 17	du , 22
P , 49	$\mathcal{B}(\mathbb{R})$, 17	$u(t^+)$, 19
\subseteq , 23	μ^+ , 23	x^* , 17
$V(u, [0, T])$, 18	μ^- , 23	(L-S), 32
$\ \nu\ $, 28	μ^* , 20	(R-S), 54
	μ_a , 43	

Bibliografía

- [1] P. Amster. *Topological Methods in the Study of Boundary Value Problems*. Springer, oct 2013.
- [2] D. Applebaum. *Limits, Limits Everywhere: The Tools of Mathematical Analysis*. Oxford University Press, may 2012.
- [3] D. Bainov and P. Simeonov. *Impulsive Differential Equations: Periodic Solutions and Applications*. CRC Press, jul 1993.
- [4] D. D. Bainov and P. S. Simeonov. *Impulsive Differential Equations: Asymptotic Properties of the Solutions*. World Scientific, mar 1995.
- [5] G. Beltritti, S. Demaria, G. Giubergia, and F. Mazzone. *The Picard-Lindelöf theorem and continuation of solutions for measure differential equations*. Czechoslovak Mathematical Journal, may 2023.
- [6] E. M. Bonotto, M. Federson, and J. G. Mesquita. *Generalized Ordinary Differential Equations in Abstract Spaces and Applications*. wiley, 2021.
- [7] B. Brogliato. *Nonsmooth Mechanics: Models, Dynamics and Control*. Springer, dic 100.
- [8] M. Carter. *The Lebesgue-Stieltjes Integral: A Practical Introduction*. Springer, dic 2012.
- [9] J. Diestel and J. J. Uhl. *Vector Measures*. American Mathematical Soc., jun 1977.
- [10] E. L. C. et. al. *Measure Theory and Fine Properties of Functions, Revised Edition*. Chapman and Hall/CRC, ene 2018.
- [11] N. A. Fava and F. Zo. *Medida e integral de Lebesgue*. Instituto Argentino de Matemática, oct 1996.
- [12] G. B. Folland. *Real Analysis: Modern Techniques and Their Applications*. Wiley, may 2007.
- [13] C. R. Harris, K. J. Millman, S. J. van der Walt, R. Gommers, P. Virtanen, D. Cournapeau, E. Wieser, J. Taylor, S. Berg, N. J. Smith, R. Kern, M. Picus, S. Hoyer, M. H. van Kerkwijk, M. Brett, A. Haldane, J. F. del Río, M. Wiebe, P. Peterson, P. Gérard-Marchant, K. Sheppard, T. Reddy, W. Weckesser, H. Abbasi, C. Gohlke, and T. E. Oliphant. Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825):357–362, Sept. 2020.

- [14] E. W. Hobson. *The Theory of Functions of a Real Variable and the Theory of Fourier's Series Volume 1*. Creative Media Partners, LLC, ago 2015.
- [15] J. D. Hunter. Matplotlib: A 2d graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3):90–95, 2007.
- [16] J. Kurzweil. *Generalized Ordinary Differential Equations: Not Absolutely Continuous Solutions*. World Scientific, ene 2012.
- [17] G. A. Leonov, H. Nijmeijer, A. Y. Pogromsky, and A. L. Fradkov. *Dynamics and Control of Hybrid Mechanical Systems*. World Scientific, ene 2010.
- [18] I. P. Natanson. *Theory of Functions of a Real Variable*. Literary Licensing, LLC, mar 2013.
- [19] S. Schwabik. *Generalized Ordinary Differential Equations*. World Scientific, oct 1992.
- [20] S. Schwabik, M. Tvrdý, and O. Vejvoda. *Differential and Integral Equations: Boundary Value Problems and Adjoints*. Academia Praha, may 1979.
- [21] R. A. Serway. *Física para ciencias e ingeniería 1 (10a. ed.)*. CENGAGE Learning, nov 2018.
- [22] G. F. Simmons and J. S. Robertson. *Ecuaciones diferenciales con aplicaciones y notas históricas*. McGraw-Hill, abr 1993.
- [23] L. Vangipuram, B. D. D., and S. Pavel. *Theory of Impulsive Differential Equations*. World Scientific, may 1989.
- [24] S. T. Zavalishchin and A. N. Sesekin. *Dynamic Impulse Systems: Theory and Applications*. Springer, feb 1997.