

## Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Descripción de la Base de Datos</b>	<b>3</b>
<b>3. Reconstrucción del Libro de Posturas</b>	<b>7</b>
<b>4. Características Estadísticas del Libro de Posturas</b>	<b>13</b>
<b>5. Modelo del Libro de Posturas Limitado</b>	<b>19</b>
5.1. La Transformación de Laplace Inversa . . . . .	22
5.2. Dinámica del Libro de Posturas Limitado . . . . .	26
5.3. Dirección de los Movimientos en el Precio . . . . .	28
5.3.1. Estimación de los Parámetros . . . . .	31
5.3.2. Resultados . . . . .	35
<b>6. Conclusiones</b>	<b>39</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>41</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>42</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>43</b>

## 1. Introducción

Los mercados de valores permiten el intercambio de activos con facilidad. La mayoría de los estudios del mercado tratan de explicar su comportamiento a través de procesos autorregresivos con el objetivo de establecer la relación del valor actual de una serie de tiempo con los valores anteriores; sin embargo, la mayoría de estos estudios ignoran el mecanismo básico detrás de estos mercados: la lógica racional de oferta y demanda entre compradores y vendedores.

Los mercados se pueden clasificar en dos tipos:

- Regidos por formadores de mercado (Quote-driven market)
- Regidos por órdenes (Order-driven market)

En los mercados regidos por formadores de mercado, éstos centralizan las órdenes proveyendo liquidez al fijar una postura de compra y una de venta; un ejemplo de esto es el especialista en el NYSE, el cual es el punto de contacto entre compradores y vendedores. El especialista tiene como misión mantener la continuidad del mercado, mantener a los inversionistas informados, comprometer capital cuando es necesario y asegurar equidad de oportunidades entre todos los clientes [1]. En los mercados regidos por órdenes, las posturas de todos los participantes se agregan en lo que se conoce como el libro de posturas. Los mercados regidos por órdenes tienen la ventaja de dar transparencia a todos los participantes, ya que éstos conocen las características de cada una de las posturas. De igual forma, existen algunos mercados híbridos donde los formadores de mercado interactúan en el libro de posturas; la Bolsa Mexicana de Valores y NASDAQ son algunos ejemplos.

La microestructura del mercado se define como el estudio del proceso y los resultados del intercambio de activos bajo un conjunto específico de reglas [2]. El estudio de la microestructura del mercado es de utilidad ya que permite identificar patrones dentro del mismo. Estos patrones pueden ser utilizados para la predicción de los movimientos del mercado y para la identificación de comportamientos fraudulentos entre los participantes del mercado. Esta información es de gran interés para los reguladores, ya que permite identificar casos de manipulación de precios.

Con el objetivo de estudiar el comportamiento de la Bolsa Mexicana de Valores, se obtuvo una base de datos con todas las posturas del libro de órdenes

en un periodo determinado. En este trabajo se describirá la base datos sujeta al estudio y se explicará la forma en que se reconstruyó el libro de posturas para llevar a cabo el análisis. Los resultados obtenidos tras la reconstrucción se compararán con los estudios de otros mercados similares. Finalmente, se describirá un modelo del libro de posturas y un método basado en la transformación inversa de Laplace para llevar a cabo la predicción del movimiento en el precio de una emisora.

## 2. Descripción de la Base de Datos

La Bolsa Mexicana de Valores proporcionó para este trabajo una base de datos con las posturas en todas las emisoras entre el 16 de noviembre de 2010 y el 18 de febrero de 2011. La base de datos se compone de dos tablas:

- Posturas Iniciales
- Registro de Posturas

La tabla de registro tiene 25,491,702 renglones; mientras que la tabla de posturas iniciales tiene 275,005. En el registro se encuentran todas las posturas que se reciben a lo largo del día. Las tablas tienen los siguientes campos:

**id** Número de identificación

**folio** Número asignado por la BMV a la postura  
Según el reglamento de la BMV; las órdenes que, en su caso, tengan modificaciones, perderán el folio de recepción que en un inicio les haya correspondido y se les asignará uno nuevo. No perderán su folio aquellas órdenes que sean modificadas únicamente para disminuir su volumen.

**fecha\_vig/vigencia** Fecha de vigencia de la postura

**casabolsa** Casa de Bolsa

**tipo\_mov** Tipo de Movimiento

Posibles Valores

CO	Compra
VE	Venta
MO	Modificación
CA	Cancelación
AH	Reconocimiento de Hecho
MH	Modificación de Hecho
CH	Cancelación de Hecho

**tipo\_op** Tipo de Operación

Posibles Valores

CO	Contado
----	---------

PI	Pico
Son operaciones que implican la compra/venta de una cantidad de acciones inferior a un lote (para la mayoría de la emisoras son 100 acciones).	
HC	Operación a Precio de Cierre
DC	Operaciones al Precio de Cierre Modalidad Después del Cierre
OR	Operaciones de Registro
OP	Oferta Pública
SR	Suscripción Recíproca
SA	Sobre Asignación

**tipo\_ord** Tipo de Orden

Posibles Valores

LP	Limitada
MC	Mercado
MA	Mejor Postura Limitada Activa

Aquella que sigue el mejor precio límite visible en su mismo sentido y su precio buscará cerrar posturas en sentido contrario que se ubiquen dentro de su precio de protección.

MP Mejor Postura Limitada Pasiva

Aquella que sigue el mejor precio límite visible en su mismo sentido. Aún y cuando existan posturas en sentido contrario dentro de su precio de protección la postura no buscará cerrarlas.

VO	Postura Limitada con Volumen Oculto
LO	Mejor Postura Limitada Activa con Volumen Oculto
HC	Operación a Precio de Cierre
DC	Operaciones al Precio de Cierre Modalidad Después del Cierre
PQ	Paquete

**tipo\_val** Tipo de Valor

**emisora** Emisora

**serie** Serie

**precio** Precio

**volumen** Volumen

La tabla de posturas iniciales utiliza además estos campos:

**fecha** Fecha

Este campo se utiliza para distinguir las órdenes que están activas al principio del día, actualiza las posiciones activas para inicializar el libro de órdenes.

**orig\_timestamp** Fecha original de la postura expresada como la cantidad de milésimas de segundo transcurridas desde la medianoche del 1 de enero de 1970

La tabla de registro utiliza estos campos:

**timestamp** Fecha de la postura expresada como la cantidad de milésimas de segundo transcurridas desde la medianoche del 1 de enero de 1970

**folio\_anterior** Folio Anterior

Se utiliza para localizar el folio de una postura que se va a modificar o cancelar.

**fecha\_folio\_ant** Fecha de Folio Anterior

**Tabla 1:** Posturas Iniciales

id	fecha	orig_timestamp	folio	fecha_vig	tipo_mov	casabol	tipo_op	tipo_ord	tipo_val	emisora	serie	precio	volumen
247	24/11/2010	1290011934040	318480	10/12/2010	CO	1277	CO	LP	1	LAB	B	25.95	2700
292	23/11/2010	1290189919100	368726	26/11/2010	VE	1392	CO	LP	1	CHDRAUI	B	39.8	100
519	23/12/2010	1292863358080	242642	24/12/2010	VE	1277	CO	LP	1	TELMEX	L	10.18	25000
651	27/01/2011	1295881813280	93317	28/01/2011	VE	1664	CO	LP	1	ASUR	B	72	100
848	15/02/2011	1295539042060	268023	18/02/2011	CO	1392	CO	LP	1	INCARSO	B-1	12.01	1000
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

**Tabla 2:** Registro de Posturas

id	timestamp	folio	vigencia	folio_anterior	fecha_folio_ant	tipo_mov	cas	bolsa	tipo_op	tipo_ord	tipo_val	emisora	serie	precio	volumen
48	1289916001700	19	0			VE		1369	CO	LP	1	ARA	*	39.6	800
329	1290785630710	124082	26/11/2010	0		CO		1369	CO	LP	1	AMX	L	35.69	12000
519	1291907916550	16032	0			AH		1305	CO	VO	1	GNP	*	58.1	1100
652	1296246310460	911020	0			VE		1369	PI	MC	1	ASUR	B	64.05	76
998	1298062094720	566388	18/02/2011	566388	18/02/2011	MO		1288	CO	MA	1	BIMBO	A	97.51	300
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

### 3. Reconstrucción del Libro de Posturas

Con los datos proporcionados se reconstruyó el libro de posturas. A lo largo del día existen un gran número de modificaciones y cancelaciones, aproximadamente el 11 % de los registros en la base de datos son modificaciones y el 35 % son cancelaciones. Por lo tanto, es indispensable identificar las posturas activas en todo momento.

Con el fin de simplificar el análisis y debido a la falta de información del volumen de las posturas del tipo VO (Volumen Oculto), se creó un algoritmo que no segrega por tipo de orden. Las posturas de tipo VO comprenden sólo el 0.55 % del total, mientras que las de tipo LP (Limitadas) representan el 93.81 %; estas últimas sí cuentan con la información del volumen. Las operaciones del tipo PI (Picos) representan el 0.61 % de la muestra y de acuerdo al reglamento de la BMV no se incluyen en el libro de posturas. Adicionalmente el algoritmo respeta el horario establecido en el reglamento de la bolsa; por lo tanto, antes de las 8:30am no se concreta ningún hecho. En la primera fase el algoritmo carga las posturas que quedaron abiertas en días anteriores de la tabla de Posturas Iniciales y en la segunda se procesa el registro.

El algoritmo se implementó en Java y se desarrolló una interfaz gráfica. Como se puede ver en la Figura 1, la interfaz permite analizar individualmente cada entrada del registro de una emisora para un día. La interfaz cuenta con 5 ventanas:

- Corros de Venta
- Corros de Compra
- Hechos Reportados por la BMV
- Hechos Reportados por el Algoritmo
- Registro

Con el botón de “Siguiente” se van procesando una a una las entradas del registro. En el caso de una postura de compra, se trata de buscar una postura en losorros de venta para perfeccionarla; si no existe, ésta se registra en losorros de compra, los cuales están ordenados de mayor a menor precio. El mismo procedimiento se realiza para las posturas de venta, de tal forma, que la postura que se encuentra en la parte inferior de losorros de venta y la que



se encuentra en la parte más alta de los corros de compra se conocen como las puntas. Una función adicional de la interfaz es la cancelación de posturas de compra o de venta. Las posturas se cancelan al seleccionarlasy oprimir el botón correspondiente. Esta función se implementó con el objeto de poder depurar errores en el funcionamiento del algoritmo.

Como se mencionó antes, los hechos se registran con la clave AH; éstos se mantienen en la ventana de “Hechos Registrados por la BMV”. Cuando el algoritmo desarrollado perfecciona un hecho, éste se registra en la ventana de “Hechos Reportados por el Algoritmo”. Para las cancelaciones y las modificaciones, es necesario localizar el folio correspondiente en los corros de compra o venta para realizar lo que a cada una corresponde. Con el objetivo de poder analizar el registro con mayor rapidez, se implementó el botón de “Play”, el cual permite avanzar 100 entradas del registro.

Corros de Venta			Hechos Reportados por la BMW		
Precio	Volumen	Folio	Hora	Precio	Volumen
VENTA	100.00 1000	238	Wed, 17 Nov 2010...	97.48	100
VENTA	100.00 9000	182	Wed, 17 Nov 2010...	97.46	200
VENTA	100.00 100	181	Wed, 17 Nov 2010...	97.70	500
VENTA	99.85 1000	72047	Wed, 17 Nov 2010...	97.70	400
VENTA	99.85 1000	71102	Wed, 17 Nov 2010...	97.70	100
VENTA	99.80 2500	76980	Wed, 17 Nov 2010...	97.70	100
VENTA	98.50 5000	19776	Wed, 17 Nov 2010...	97.55	200
VENTA	98.80 5000	142459	Wed, 17 Nov 2010...	97.56	1000
VENTA	98.45 200	41111	Wed, 17 Nov 2010...	97.56	400
VENTA	97.90 200	79158	Wed, 17 Nov 2010...	97.56	100
VENTA	97.90 100	65162	Wed, 17 Nov 2010...	97.56	100
VENTA	97.70 400	84021	Wed, 17 Nov 2010...	97.70	100
Corros de Compra			Hechos Reportados por el Algoritmo		
Precio	Volumen	Folio	Hora	Precio	Volumen
COMPRA	97.55 1000	71242	Wed, 17 Nov 2010...	97.32	100
COMPRA	97.55 400	84342	Wed, 17 Nov 2010...	97.32	200
COMPRA	97.35 300	24757	Wed, 17 Nov 2010...	97.70	500
COMPRA	97.35 1000	25465	Wed, 17 Nov 2010...	97.70	400
COMPRA	97.35 19100	31880	Wed, 17 Nov 2010...	97.70	100
COMPRA	97.10 1000	84181	Wed, 17 Nov 2010...	97.70	100
COMPRA	97.11 100	1004	Wed, 17 Nov 2010...	97.55	200
COMPRA	97.00 3000	21514	Wed, 17 Nov 2010...	97.55	400
COMPRA	97.00 1100	622620	Wed, 17 Nov 2010...	97.55	1000
COMPRA	97.00 200	732628	Wed, 17 Nov 2010...	97.56	400
COMPRA	97.00 1000	791212	Wed, 17 Nov 2010...	97.56	100
COMPRA	96.80 1000	304899	Wed, 17 Nov 2010...	97.70	100
COMPRA	96.40 3000	40334	Wed, 17 Nov 2010...	97.70	100
Casa de Bol...			Orden		
Tipo	Precio	Folio	Folio	Ant.	Casa de Bol...
VE	97.69	1000	Wed, 17 Nov 2010 08:58:54 CST	85324	LP
CO	97.10	2000	Wed, 17 Nov 2010 08:58:56 CST	85392	LP
CA	97.90	200	Wed, 17 Nov 2010 08:58:59 CST	79158	LP
CA	97.55	400	Wed, 17 Nov 2010 08:59:11 CST	84342	LP
CO	97.69	300	Wed, 17 Nov 2010 08:59:11 CST	85941	LP
AH	97.69	300	Wed, 17 Nov 2010 08:59:11 CST	11990	LP
CO	97.55	100	Wed, 17 Nov 2010 08:59:12 CST	85972	LP
CO	97.55	100	Wed, 17 Nov 2010 08:59:22 CST	86319	LP
VE	97.69	200	Wed, 17 Nov 2010 08:59:28 CST	86497	LP
CA	97.69	200	Wed, 17 Nov 2010 08:59:32 CST	86497	LP
VE	97.70	500	Wed, 17 Nov 2010 08:59:38 CST	86934	LP

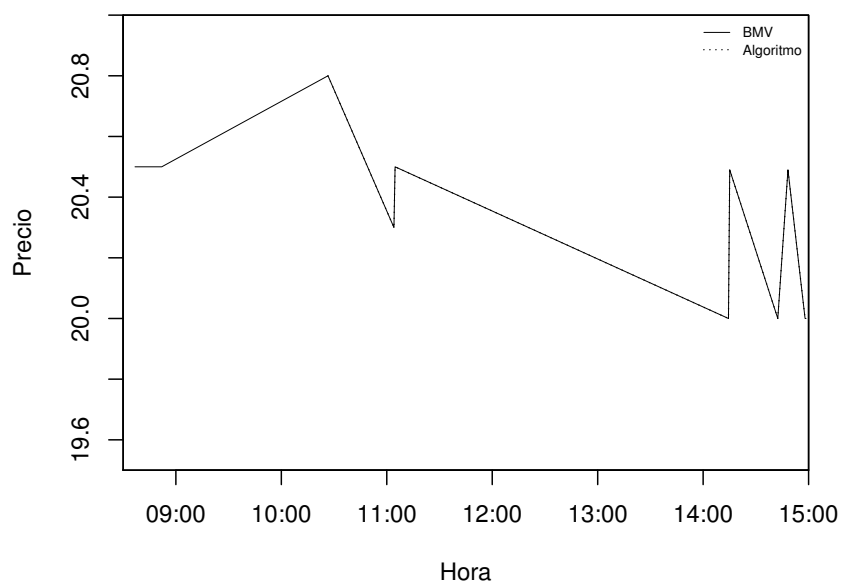
Puntas

Postura  
Siguiente

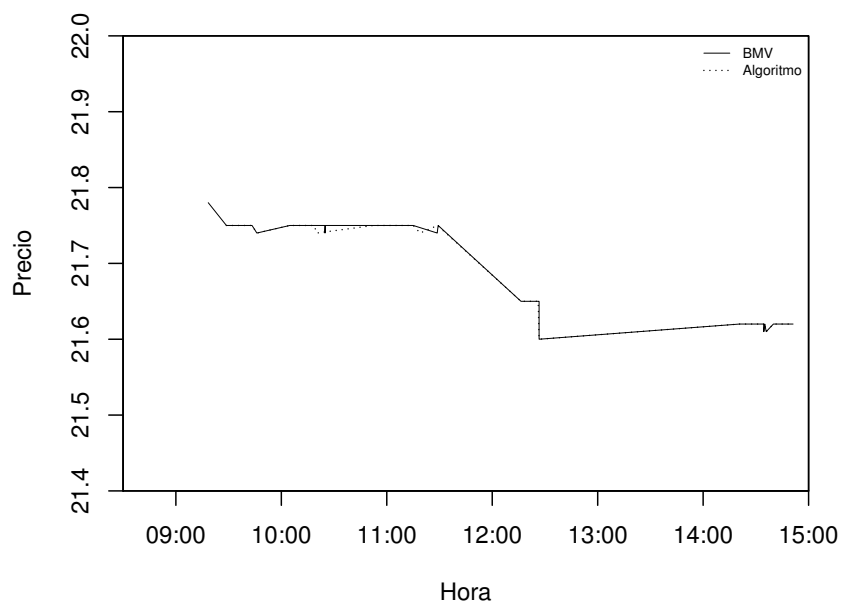
Figura 1: Captura de pantalla de la Interfaz desarrollada en Java

Para medir la efectividad del algoritmo se compararon los hechos reportados por la BMV con los hechos arrojados por el algoritmo y se ignoraron acciones de muy baja bursatilidad. Por ejemplo, se analizó la acción de KUO serie B, ésta tiene en promedio alrededor de 28 posturas diarias en la base de datos comparado con la media de 2,550 posturas diarias para las demás emisoras; y se observó que para la muestra de 68 días, el algoritmo sólomente reprodujo el 50.3 % del volumen operado según la BMV. Al realizar un análisis más profundo del volumen operado de esta acción durante el plazo mencionado, se encontró que la baja efectividad del algoritmo se debe a una serie de posturas de volumen oculto que se registraron el 29 de diciembre de 2010. Si se excluye esta fecha, el algoritmo reporta un volumen de 5,607,600 acciones mientras que la BMV reporta 5,972,500, es decir, el algoritmo tiene una efectividad del 93.9 %. Para AMX serie L, la acción con mayor volumen en la BMV con un promedio 44,396 posturas por día, el algoritmo reproduce el 89.7 % de las operaciones.

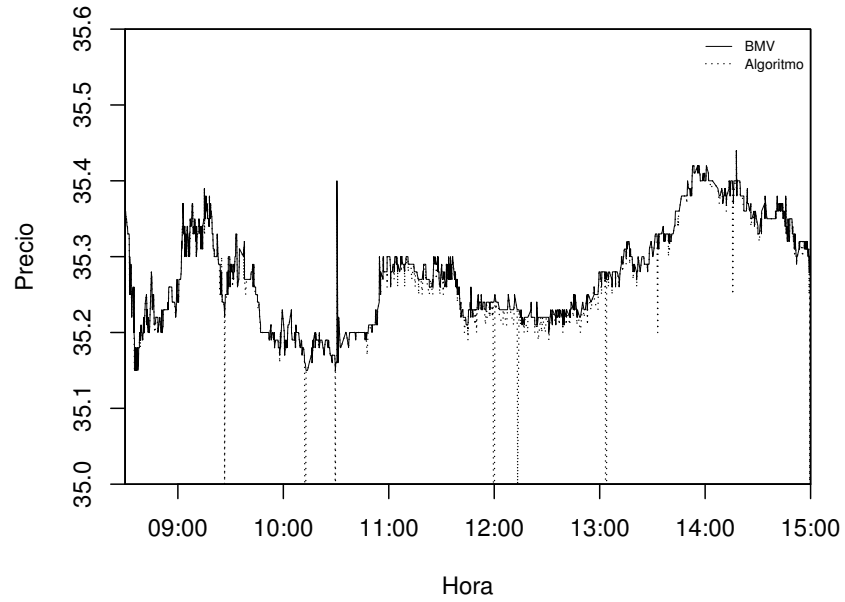
No sólo es importante analizar el volumen operado, sino también la evolución del precio de una acción. Para realizar el análisis de la tendencia del precio, se utilizó el precio promedio ponderado por volumen, VWAP (Volume-weighted average price). Para la acción de KUO el VWAP del 28 de enero de 2011 registrado por la BMV es de 21.72491, el registrado por el algoritmo es de 21.72289. Por ejemplo, el 31 de diciembre de 2010 se encontró una diferencia entre el volumen reportado por la bolsa y el del algoritmo mayor al 50 %; sin embargo, el VWAP de la bolsa y del algoritmo son similares, 20.35595 y 20.27741 respectivamente. Para el caso de AMX, el 28 de diciembre el algoritmo tuvo sólomente un 69.0 % de efectividad para replicar el volumen, sin embargo, la efectividad de la tendencia del precio de las operaciones superó el 99.92 %. El 20 de enero de 2011, día de mayor efectividad en términos del volumen, el algoritmo también reproduce el VWAP casi al 100 %.



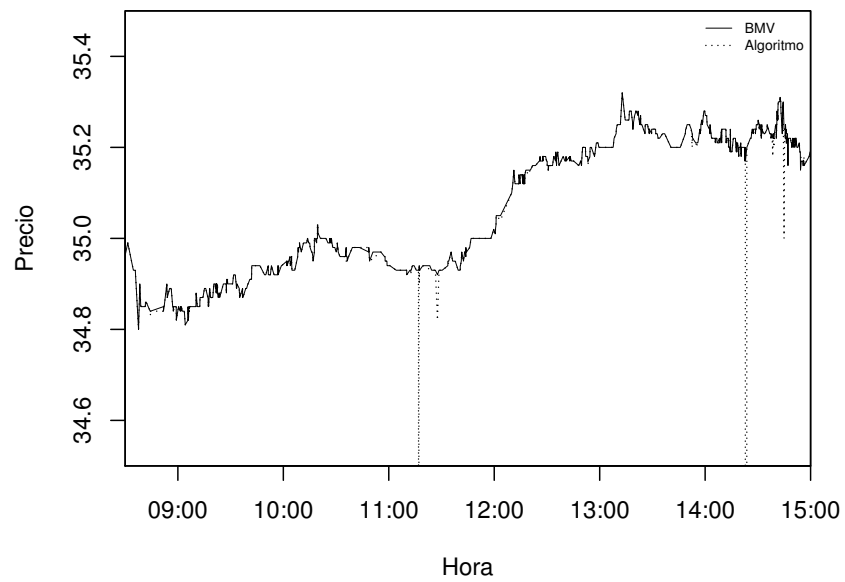
**Figura 2:** Reconstrucción: Kuo diciembre 31



**Figura 3:** Reconstrucción: Kuo enero 28



**Figura 4:** Reconstrucción: AMX enero 20



**Figura 5:** Reconstrucción: AMX diciembre 28

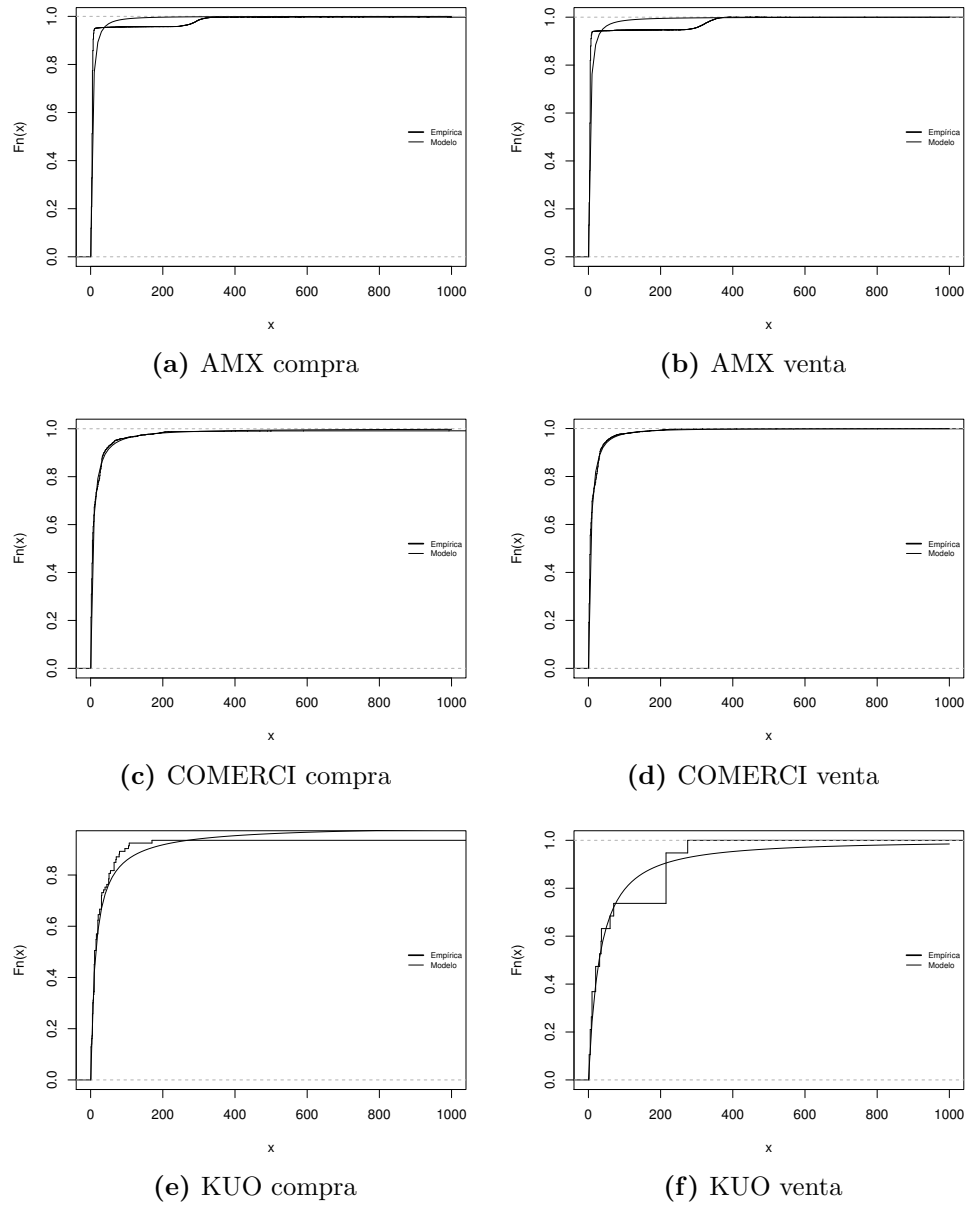
#### 4. Características Estadísticas del Libro de Posturas

Los mercados financieros ofrecen una gran cantidad de información que dificulta su análisis, sin embargo, es posible identificar algunos patrones. Por ejemplo, se ha identificado que la distribución de los precios de las posturas sigue una ley de potencias, es decir, que las frecuencias decrecen exponencialmente al aumentar la variable. Si definimos a  $b(t)$  como el precio de la mejor postura de compra y  $a(t)$  como el precio de la mejor postura de venta, el precio de una nueva postura de compra o venta se puede expresar como  $b(t) - \Delta$  ó  $a(t) + \Delta$  respectivamente, donde la  $\Delta$  está expresada en pujas o ticks. Una puja es el importe mínimo en que puede variar el precio unitario de cada título. Cabe mencionar que  $\Delta$  puede tomar valores negativos. Si por ejemplo, con  $\Delta < 0$ , se registra una postura con el precio  $b(t) - \Delta \geq a(t)$  entonces se concretará un hecho, mientras que si  $b(t) - \Delta < a(t)$  entonces el precio  $b(t+1) = b(t) - \Delta$ . Si se excluyen las posturas donde  $\Delta \leq 0$ , se puede decir que los precios siguen una distribución definida por:

$$P(\Delta) \propto \frac{A}{(\Delta + \lambda)^{\alpha+1}} \quad (4.1)$$

Se ajustó el modelo para distintas acciones, excluyendo todas las modificaciones, las cuales se podrían en algunos casos considerar como una nueva postura. Otros estudios han encontrado que el parámetro  $\alpha$  es muy similar entre las distintas emisoras [3] de un mercado en particular, sin embargo, como se puede ver la Tablas 3 y 4, las acciones tienen parámetros distintos. La distribución ajustada es conocida como Lomax o Pareto Tipo II con  $\mu = 0$ . La media de esta distribución está definida cuando  $\alpha > 1$ ; en este análisis existen algunas emisoras para las que no se podría definir la media. En otros estudios se destaca que el parámetro  $\alpha$  es similar para las posturas de compra y venta de una misma emisora [4]. En las acciones utilizadas en este trabajo el parámetro es similar en la mayoría de los casos; sin embargo, en el caso de KUO el parámetro  $\alpha$  para las posturas de venta es 50% mayor al de las de compra.

Se realizó un estudio similar para la distribución del volumen de las posturas. Para volúmenes superiores a 1,000 títulos también se puede representar con una distribución Lomax. Otro fenómeno interesante es la preferencia de los participantes por volúmenes múltiples de 1,000. Como se puede ver en la



**Figura 6:** Ajuste del Modelo de Distribución de Precios de las Posturas

**Tabla 3:** Distribución de Precios de las Posturas de Compra

	$\lambda$	$\alpha$	#posturas	$\Delta > 0$
<b>AMX</b>	7.4441	1.7098	629,302	454,039
<b>BIMBO</b>	14.7809	0.8242	37,021	9,042
<b>COMERCI</b>	7.6756	1.2256	20,955	4,201
<b>GRUMA</b>	58.6601	4.4624	49,895	27,845
<b>HERDEZ</b>	21.1333	2.3332	6,811	1,773
<b>KUO</b>	11.3803	0.8556	495	93

**Tabla 4:** Distribución de Precios de las Posturas de Venta

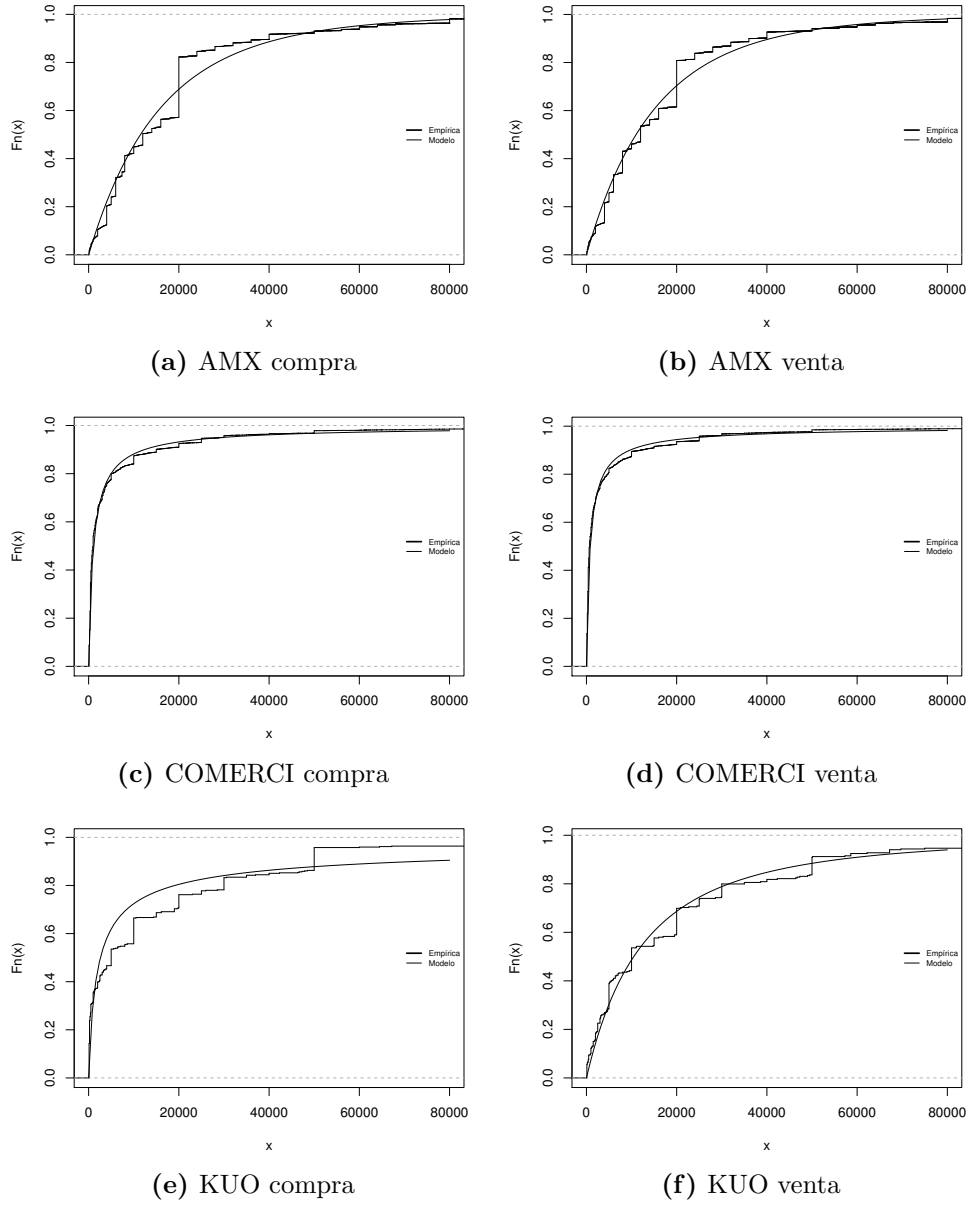
	$\lambda$	$\alpha$	#posturas	$\Delta > 0$
<b>AMX</b>	6.2232	1.5022	767,215	555,595
<b>BIMBO</b>	31.2291	1.2005	36,671	11,400
<b>COMERCI</b>	11.0780	1.6555	28,893	6,584
<b>GRUMA</b>	63.2991	4.1402	49,026	30,012
<b>HERDEZ</b>	21.1781	2.3215	5,493	1,263
<b>KUO</b>	42.1747	1.3034	319	19

Tabla 5, en la mayoría de los casos los parámetros para una misma emisora son similares para las posturas de compra y venta. Para 4 de las 6 emisoras estudiadas se puede establecer la media, ya que  $\alpha > 1$ . En el caso de COMERCI no se puede definir una media con el modelo ajustado para las posturas de compra ni para las de venta. En el caso de KUO no se puede definir la media para las posturas de compra; para HERDEZ no está definida para las posturas de venta.

Por ejemplo, con el modelo ajustado, la media del volumen de las posturas de compra de AMX es de 18,322.35 títulos, mientras que el de venta es de 17,491.36. La media del volumen de compra para BIMBO es de 1,647.74 mientras que la media las posturas de venta es de 1,802.22.

La distribución de la distancia  $\Delta$  de las cancelaciones del mejor precio de compra  $b(t)$  y de venta  $a(t)$  también se puede modelar mediante una distribución Lomax. Se debe considerar, como se mostrará en las distribuciones empíricas, que un gran número de las cancelaciones suceden con  $\Delta = 0$ ; es decir, al mejor precio de compra y venta. La distribución Lomax asume que  $F(0) = 0$ , lo cual no sucede en este análisis. Para evitar esto, sólo se considerarán las posturas donde  $\Delta > 0$ , y se mencionará por separado la proporción





**Figura 7:** Ajuste del Modelo de Distribución del Volumen de las Posturas

**Tabla 5:** Distribución del Volumen de las Posturas

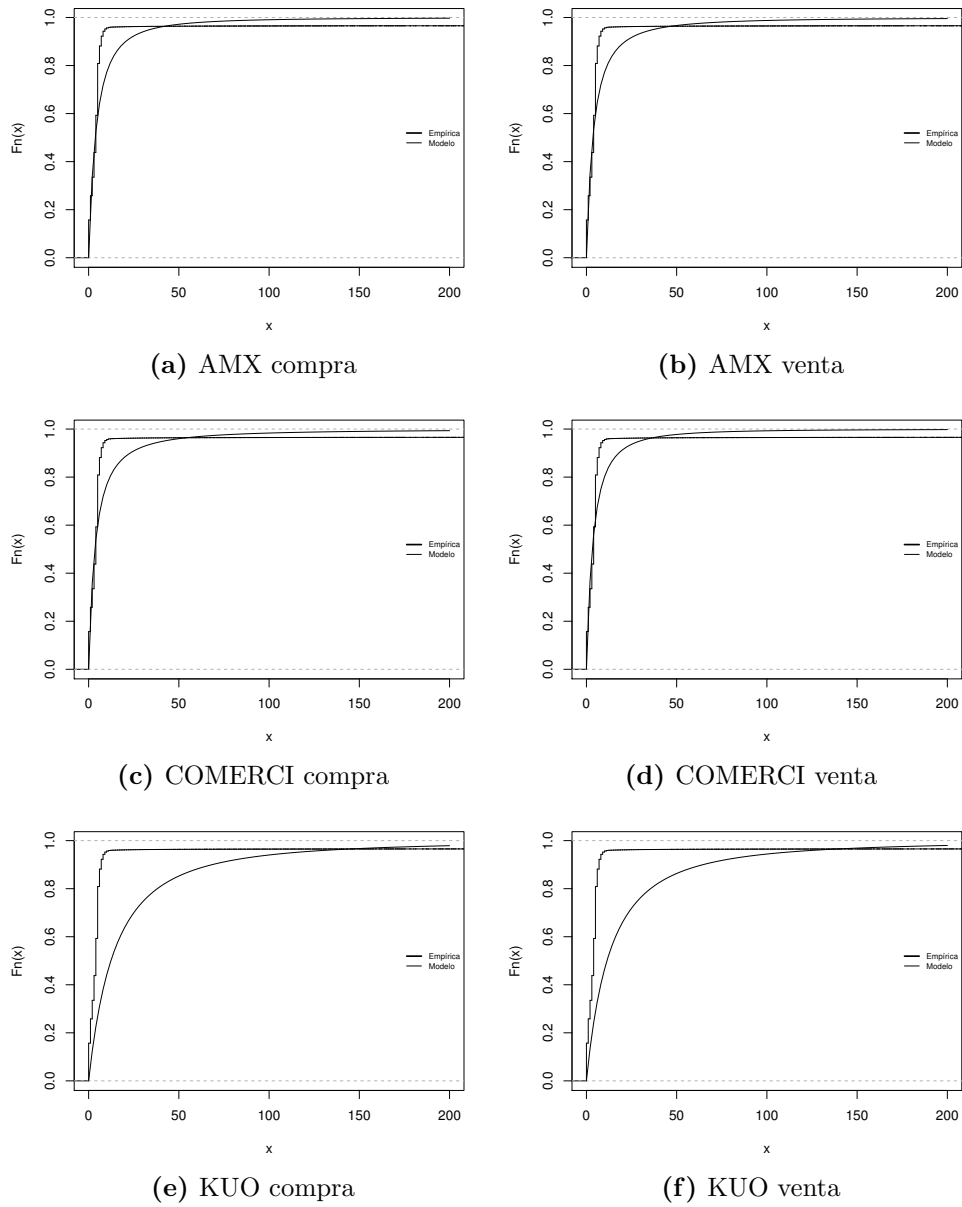
	Compra		Venta	
	$\lambda$	$\alpha$	$\lambda$	$\alpha$
<b>AMX</b>	115,318.20	7.2939	112,105.20	7.4092
<b>BIMBO</b>	689.36	1.4184	550.10	1.3052
<b>COMERCI</b>	863.75	0.8432	648.47	0.8336
<b>GRUMA</b>	6,135.30	2.6177	9,413.25	3.1836
<b>HERDEZ</b>	4,064.11	1.2659	2,316.45	0.8967
<b>KUO</b>	975.37	0.5320	24,193.91	1.9253

de las cancelaciones donde  $\Delta = 0$ .

Como se puede ver en la Figura 8, la distribución Lomax no es la más adecuada, ya que el grueso de las cancelaciones se concentra en el intervalo donde  $\Delta < 20$ . La media de cada una de las emisoras en la muestra elegida es menor a 35; por lo tanto, las cancelaciones se concentran cerca de los mejores precios de compra y venta respectivamente. Es importante considera que en las emisoras estudiadas, en el peor de los casos, cerca del 15 % de las cancelaciones suceden al mejor precio de compra o venta. En el caso de HERDEZ para las posturas de venta, más del 50 % de las cancelaciones se realizan en la punta.

**Tabla 6:** Distribución de las Cancelaciones de las Posturas

	Compra			Venta		
	$\lambda$	$\alpha$	$\Delta = 0$	$\lambda$	$\alpha$	$\Delta = 0$
<b>AMX</b>	7.6567	1.7677	0.1570 %	6.2821	1.5505	0.1575 %
<b>BIMBO</b>	3.9398	0.6827	0.4175 %	14.4289	1.1085	0.3817 %
<b>COMERCI</b>	5.2260	1.3656	0.4670 %	6.8606	1.7948	0.5354 %
<b>GRUMA</b>	88.3815	6.9082	0.2002 %	91.1204	6.4492	0.1461 %
<b>HERDEZ</b>	15.5851	1.7531	0.4269 %	20.0407	1.9113	0.5392 %
<b>KUO</b>	26.0058	1.7855	0.4031 %	22.8162	1.7143	0.6486 %



**Figura 8:** Ajuste del Modelo de Distribución de las Cancelaciones de las Posturas

## 5. Modelo del Libro de Posturas Limitado

Un proceso estocástico  $\{X(t); t \geq 0\}$  con un conjunto de estados  $\mathcal{S} \subset I$  se dice que es una cadena de Markov homogénea si para toda  $n \in I$ , estados  $i_0, i_1, \dots, i_n, i, j$  y tiempos  $0 \leq \tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_n < s$

$$\begin{aligned} P\{X(t+s) = j | X(\tau_0) = i_0 \dots X(\tau_n) = i_n, X(s) = i\} \\ = P\{X(t+s) = j | X(s) = i\} = P\{X(t) = j | X(0) = i\} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Un proceso estocástico se conoce como proceso de nacimiento y muerte con un espacio de estados  $\mathcal{S}$  si cumple con los siguientes axiomas:

1.  $\mathcal{S} \subset I = \{0, 1, 2, \dots\}$
2. Es una cadena Markov homogénea
3. Existen las constantes no negativas  $\lambda_j$  y  $\mu_j$ , con  $j = 0, 1, \dots$  con  $\mu_0 = 0$ , tal que para  $s > 0$  y  $t \geq 0$ , se cumple:

$$P\{X(t+s) = j+1 | X(t) = j\} = \lambda_j s + o(s) \quad j \in I \quad (5.2a)$$

$$P\{X(t+s) = j-1 | X(t) = j\} = \mu_j s + o(s) \quad j \in I \quad (5.2b)$$

$$P\{X(t+s) = j | X(t) = j\} = 1 - (\lambda_j + \mu_j)s + o(s) \quad j \in I \quad (5.2c)$$

$X(t)$  se conoce como el tamaño de la población al tiempo  $t$ . A  $\lambda_j$  se le conoce como la tasa de nacimiento y  $\mu_j$  como la tasa de muerte. Una medida interesante de los procesos de nacimiento y muerte es el tiempo del primer paso del estado  $i$  al estado  $j$ , que se denota como  $T_{i,j}$ . Para calcular la distribución de esta variable aleatoria es conveniente utilizar la transformación de Laplace bilateral. La cual se define de la siguiente forma:

$$\hat{f}(s) = \mathcal{L}\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (5.3)$$

El tiempo  $T_{i,j}$  se puede expresar de la siguiente forma:

$$T_{i,j} = T_{i,i+1} + T_{i+1,i+2} + \dots + T_{j-1,j} \quad (5.4)$$

donde  $T_{k,k+1}$  con  $k = 1, 2, \dots, j-1$  son independientes, lo cual permite utilizar la siguiente propiedad de la transformación de Laplace:

$$\hat{f}_{X+Y}(s) = E[e^{-s(X+Y)}] = E[e^{-sX}] E[e^{-sY}] = \hat{f}_X(s) \hat{f}_Y(s) \quad (5.5)$$

Lo cual permite expresar a la transformación de la función de densidad de  $T_{i,j}$  como:

$$\hat{f}_{i,j}(s) = \prod_{k=i}^{j-1} \hat{f}_{k,k+1}(s) \quad (5.6)$$

haciendo deseable encontrar una transformación  $\mathcal{L}^{-1}$  tal que:

$$\mathcal{L}^{-1}\{\hat{f}(s)\} = f(t) \quad (5.7)$$

Primero es necesario encontrar una expresión para  $\hat{f}_{i,i-1}$ . Ahora, si condicionamos  $T_{i,i-1}$  a la primera transición, donde  $S_1$  es el tiempo para el primer evento, podemos expresarlo como:

$$T_{i,i-1} = \begin{cases} S_1, & \text{si } X(S_1) = i - 1 \\ S_1 + T_{i+1,i-1}, & \text{si } X(S_1) = i + 1 \end{cases} \quad (5.8)$$

$$T_{i+1,i-1} = T_{i+1,i} + T_{i,i-1} \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} F_{i,i-1}(t) &= P\{T_{i+1,i-1} \leq t\} = P\{T_{i,i-1} \leq t | X(S_1) = i - 1\}P\{X(S_1) = i - 1\} + \\ &\quad P\{T_{i,i-1} \leq t | X(S_1) = i + 1\}P\{X(S_1) = i + 1\} \\ &= P\{S_1 \leq t\}P\{X(S_1) = i - 1\} + \\ &\quad P\{S_1 + T_{i+1,i-1} \leq t\}P\{X(S_1) = i + 1\} \\ &= \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} P\{S_1 \leq t\} + \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} P\{S_1 + T_{i+1,i-1} \leq t\} \\ &= \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} F_{S_1}(t) + \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} F_{S_1 + T_{i+1,i-1}}(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} F_{i,i-1}(t) &= f_{i,i-1}(t) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \frac{d}{dt} F_{S_1}(t) + \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \frac{d}{dt} F_{S_1 + T_{i+1,i-1}}(t) \\ &= \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} f_{S_1}(t) + \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} f_{S_1 + T_{i+1,i-1}}(t) \end{aligned}$$

Ahora  $S_1$  tiene una distribución exponencial con media  $\frac{1}{\lambda_i + \mu_i}$  por lo que:

$$\mathcal{L}\{f_{S_1}(t)\} = \int_0^\infty e^{-st} f_{S_1}(t) dt = (\lambda_i + \mu_i) \int_0^\infty e^{-(\lambda_i + \mu_i + s)t} dt = \frac{\lambda_i + \mu_i}{\lambda_i + \mu_i + s}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\{f_{i,i-1}(t)\} &= \hat{f}_{i,i-1}(s) = \mathcal{L}\left\{\frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} f_{S_1}(t) + \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} f_{S_1 + T_{i+1,i-1}}(t)\right\} \\ &= \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \hat{f}_{S_1}(s) + \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \hat{f}_{S_1 + T_{i+1,i-1}}(s) \\ &= \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \frac{\lambda_i + \mu_i}{\lambda_i + \mu_i + s} + \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \hat{f}_{S_1}(s) \hat{f}_{T_{i+1,i-1}}(s) \hat{f}_{T_{i,i-1}}(s) \\ &= \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \frac{\lambda_i + \mu_i}{\lambda_i + \mu_i + s} + \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \frac{\lambda_i + \mu_i}{\lambda_i + \mu_i + s} \hat{f}_{i+1,i}(s) \hat{f}_{i,i-1}(s) \end{aligned}$$

$$\hat{f}_i(s) = \hat{f}_{i,i-1}(s) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i + s - \lambda_i \hat{f}_{i+1}(s)} \quad (5.10)$$

Otro concepto que es necesario introducir es lo que se conoce como fracciones continuas. Las cuales son expresiones de la forma:

$$\frac{a_1}{b_1 + \frac{a_2}{b_2 + \frac{a_3}{b_3 + \ddots}}}$$

Una fracción continua infinita se define con las sucesiones  $[\{a_n\}_1^\infty, \{b_n\}_1^\infty, \{w_n\}_1^\infty]$  donde  $t_k$  se define como:

$$t_k := \frac{a_k}{b_k + u}$$

donde:

$$w_n := t_1 \circ t_2 \circ \cdots \circ t_n(0)$$

por lo que se puede denotar a la fracción continua  $[\{a_n\}_1^\infty, \{b_n\}_1^\infty, \{w_n\}_1^\infty]$  de la siguiente forma:

$$\Phi_{k=i}^\infty \frac{a_n}{b_n}$$

Ahora iterando en la expresión que se obtuvo previamente para  $\hat{f}_i(s)$ , obtenemos:

$$\hat{f}_i(s) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i + s - \lambda_i \frac{\mu_{i+1}}{\lambda_{i+1} + \mu_{i+1} + s - \lambda_{i+1} \frac{\mu_{i+2}}{\lambda_{i+2} + \mu_{i+2} + s + \ddots}}}$$

$$\hat{f}_i(s) = -\frac{1}{\lambda_{i-1}} \frac{-\lambda_{i-1}\mu_i}{\lambda_i + \mu_i + s + \frac{-\lambda_i\mu_{i+1}}{\lambda_{i+1} + \mu_{i+1} + s + \frac{-\lambda_{i+1}\mu_{i+2}}{\lambda_{i+2} + \mu_{i+2} + s + \ddots}}}$$

$$\hat{f}_i(s) = -\frac{1}{\lambda_{i-1}} \Phi_{k=i}^{\infty} \frac{-\lambda_{k-1}\mu_k}{\lambda_k + \mu_k + s} \quad (5.11)$$

Debido a las propiedades de la función de densidad  $f$ , se puede probar [5] que  $\hat{f}$  converge y está acotada entre la sucesión creciente de aproximantes pares  $w_{2n}$  y la sucesión decreciente de aproximantes impares  $w_{2n+1}$ :

$$w_{2n}(s) < \hat{f}(s) < w_{2n+1}(s) \text{ para toda } n$$

Donde  $w_n$  se puede calcular de la siguiente forma:

$$w_n = \frac{P_n}{Q_n}$$

donde  $P_0 = 0, P_1 = a_1, Q_0 = 1, Q_1 = b_1$  con:

$$P_n = b_n P_{n-1} + a_n P_{n-2}$$

$$Q_n = b_n Q_{n-1} + a_n Q_{n-2}$$

### 5.1. La Transformación de Laplace Inversa

El reto que aún queda es encontrar una forma de calcular numéricamente  $\mathcal{L}^{-1}$ , la cual está definida por la siguiente integral de variable compleja, que se puede evaluar a lo largo de la línea vertical  $\gamma = a$ , de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} f(t) = \mathcal{L}^{-1}\{\hat{f}(s)\} &= \frac{1}{2\pi i} \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{a-iT}^{a+iT} e^{st} \hat{f}(s) ds \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{(a+iu)t} \hat{f}(a+iu) du \\ &= \frac{e^{at}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (\cos ut + i \sin ut) \hat{f}(a+iu) du \\ &= \frac{e^{at}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \operatorname{Re}(\hat{f}(a+iu)) \cos ut - \operatorname{Im}(\hat{f}(a+iu)) \sin ut \right] du \\ &= \frac{2e^{at}}{\pi} \int_0^{\infty} \operatorname{Re}(\hat{f}(a+iu)) \cos ut du \end{aligned}$$

Para evaluar esta integral se utiliza un método [6] que se basa en la expansión de series de Fourier. Si se considera una función  $h(t)$  tal que  $h(t) = 0$  para

$t < 0$  la cual se dividirá en segmentos de tamaño  $T$ , al reflejar cada segmento, se puede construir un conjunto de funciones pares  $g_n(t)$ , tal que:

$$g_n(t) = \begin{cases} h(t), & \text{si } nT \leq t \leq (n+1)T \\ h(2nT - t), & \text{si } (n-1)T \leq t \leq nT \end{cases}$$

Estas funciones se pueden expresar en el intervalo  $(-T, T)$ . De tal forma que para  $n = 0, 2, 4, \dots$ :

$$g_n(t) = \begin{cases} h(nT + t), & \text{si } 0 \leq t \leq T \\ h(nT - t), & \text{si } -T \leq t \leq 0 \end{cases}$$

y para  $n = 1, 3, 5, \dots$

$$g_n(t) = \begin{cases} h((n+1)T - t), & \text{si } 0 \leq t \leq T \\ h((n+1)T + t), & \text{si } -T \leq t \leq 0 \end{cases}$$

La expansión en series de Fourier de  $g_n(t)$  es la siguiente:

$$g_n(t) = \frac{a_{n,0}}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_{n,k} \cos\left(\frac{k\pi t}{T}\right)$$

donde  $a_{n,k}$  está definido como:

$$a_{n,k} = \begin{cases} \frac{2}{T} \int_0^T h(nT + x) \cos\left(\frac{k\pi}{T}x\right) dx, & \text{si } n = 0, 2, 4, \dots \\ \frac{2}{T} \int_0^T h((n+1)T - x) \cos\left(\frac{k\pi}{T}x\right) dx, & \text{si } n = 1, 3, 5, \dots \end{cases}$$

Esto se puede expresar de forma compacta como:

$$a_{n,k} = \frac{2}{T} \int_{nT}^{(n+1)T} h(t) \cos\left(\frac{k\pi}{T}t\right) dt$$

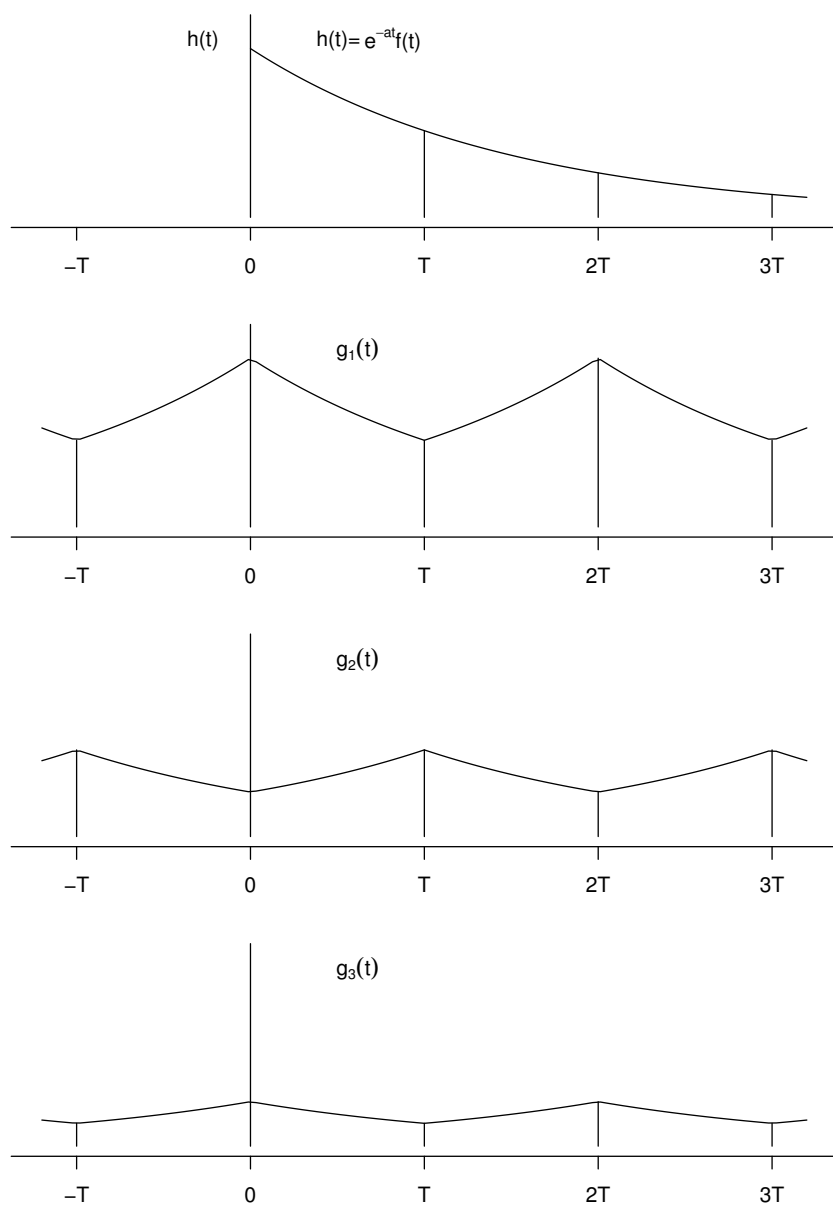
Ahora sumando las funciones  $g_n(t)$ :

$$\sum_{n=0}^{\infty} g_n(t) = \frac{2}{T} \left[ \frac{A(w_0)}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A(w_k) \cos\left(\frac{k\pi}{T}t\right) \right]$$

donde:

$$A(w_k) = \int_0^{\infty} h(t) \cos\left(\frac{k\pi}{T}t\right) dt$$





**Figura 9:** Funciones  $g_n(t)$

Ahora si se introduce un factor de atenuación tal que:

$$h(t) = e^{-at} f(t)$$

de tal forma que  $A(w_k)$  es la transformación de Laplace de una función en los números reales.

De esta forma, multiplicando ambos lados por el factor de atenuación:

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{at} g_n(t) = \frac{2e^{at}}{T} \left[ \frac{1}{2} \{ \hat{f}(a) \} + \sum_{k=1}^{\infty} \operatorname{Re} \left( \hat{f} \left( a + \frac{k\pi i}{T} \right) \right) \cos \left( \frac{k\pi}{T} t \right) \right]$$

por lo que de la definición de  $g_n(t)$ :

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{at} g_n(t) = \sum_{n=0}^{\infty} e^{at} h(2nT + t) + \sum_{n=1}^{\infty} e^{at} h(2nT - t)$$

de tal forma que sustituyendo  $h(t) = e^{-at} f(t)$ :

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{at} g_n(t) = f(t) + \text{error}$$

Con esto podemos deducir el resultado:

$$f(t) \approx \frac{2e^{at}}{T} \left[ \frac{1}{2} \{ \hat{f}(a) \} + \sum_{k=1}^{\infty} \operatorname{Re} \left( \hat{f} \left( a + \frac{k\pi i}{T} \right) \right) \cos \left( \frac{k\pi}{T} t \right) \right] \quad (5.12)$$

Esto es similar al resultado que se obtiene si se utilizarax la regla del trapecio para evaluar la integral de la transformación inversa. La cual tiene como resultado la siguiente expresión:

$$f(t) \approx f_h(t) = \frac{he^{at}}{\pi} \operatorname{Re}(\hat{f}(a)) + \frac{2he^{at}}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \operatorname{Re}(\hat{f}(a + ikh)) \cos kht$$

para acelerar la convergencia de la serie [7], se toma  $h = \pi/2t$  y  $a = A/2t$ , se llega a la siguiente serie, la cual es casi alternante:

$$f_h(t) = \frac{e^{A/2}}{2t} \operatorname{Re} \left( \hat{f} \left( \frac{A}{2t} \right) \right) + \frac{e^{A/2}}{t} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \operatorname{Re} \left( \hat{f} \left( \frac{A + 2k\pi i}{2t} \right) \right)$$

esta aproximación tiene un error de discretización acotado [7].

Debido a que la serie es casi alternante se pueden utilizar métodos para acelerar la convergencia, tal como la transformación de Euler. Al utilizar este método obtenemos la siguiente aproximación:

$$E(m, n, t) = \sum_{k=0}^m \binom{m}{k} 2^{-m} s_{n+k}(t)$$

donde:

$$s_n = \frac{e^{A/2}}{2t} \operatorname{Re} \left( \hat{f} \left( \frac{A}{2t} \right) \right) + \frac{e^{A/2}}{t} \sum_{k=1}^n (-1)^k \operatorname{Re} \left( \hat{f} \left( \frac{A + 2k\pi i}{2t} \right) \right)$$

Se sugiere utilizar  $m = 11$  y  $n = 15$ . Para probar la ventaja de la aceleración se encontró la transformación de Laplace de la función de densidad de una variable aleatoria con distribución exponencial. La aceleración permite encontrar una aproximación muy cercana sumando 26 términos mientras que cuando no se recurre a este método, el error de aproximación es mayor aún utilizando 2,000 términos. Es importante mencionar que las funciones deben de tener ciertas propiedades para que la transformación de Euler sea útil.

## 5.2. Dinámica del Libro de Posturas Limitado

Para modelar la dinámica del libro de posturas limitado se considera el modelo propuesto en [8]. Este modelo tiene varias bondades que permiten la utilización de ciertas herramientas matemáticas para realizar el cálculo de las probabilidades de ciertos eventos. El modelo también tiene ciertas limitaciones. En primer lugar considera que las llegadas de las posturas siguen un proceso Poisson, es decir que son completamente aleatorias. También considera posturas con un volumen estandarizado o único.

Si se considera un mercado donde las posturas se pueden colocar en una matriz de precios  $\{1, \dots, n\}$  múltiplos de una puja.  $n$  se elige de forma que es suficientemente grande para que el precio de todas las posturas estén dentro de este rango. El estado del libro se puede representar mediante el proceso  $X(t) = \{X_1(t), \dots, X_n(t)\}$  donde  $|X_p(t)|$  es el número de posturas a un precio  $p$ . Si  $X_p(t) < 0$  se dice que hay  $-X_p(t)$  posturas de compra, cuando  $X_p > 0$  existen  $X_p$  posturas de venta.

El precio de la mejor postura de venta  $p_A(t)$  se define como:

$$p_A(t) = \inf\{p = 1, \dots, n, X_p(t) > 0\}$$

de igual forma el precio de la mejor postura de compra se define como:

$$p_B(t) = \sup\{p = 1, \dots, n, X_p(t) < 0\}$$

También se pueden definir las siguientes cantidades, el precio medio  $p_M(t)$  y la diferencia o “spread”  $p_S(t)$  entre la mejor postura de compra y venta respectivamente:

$$p_M(t) = \frac{p_B(t) + p_A(t)}{2}$$

$$p_S(t) = p_A(t) - p_B(t)$$

El libro de posturas limitado se actualiza al llegar nuevas posturas. Para un estado  $x \in \mathbb{Z}$  con  $1 \leq p \leq n$  se define:

$$x^{p\pm 1} = x \pm (0, \dots, 1, \dots, 0)$$

donde el 1 se encuentra en la posición  $p$  del vector anterior. De esta forma:

- Una postura de compra a un precio  $p < p_A(t)$  incrementa la cantidad al nivel  $p$ :  $x \rightarrow x^{p-1}$
- Una postura de venta a un precio  $p > p_B(t)$  incrementa la cantidad al nivel  $p$ :  $x \rightarrow x^{p+1}$
- Una postura de compra a mercado disminuye la cantidad al mejor precio de venta:  $x \rightarrow x^{p_A(t)-1}$
- Una postura de venta a mercado disminuye la cantidad al mejor compra de venta:  $x \rightarrow x^{p_B(t)+1}$
- Una cancelación de una postura activa de compra a un precio  $p < p_A(t)$  disminuye la cantidad al nivel  $p$ :  $x \rightarrow x^{p+1}$
- Una cancelación de una postura activa de venta a un precio  $p > p_B(t)$  disminuye la cantidad al nivel  $p$ :  $x \rightarrow x^{p-1}$

Los eventos mencionados arriba se modelan con procesos de Poisson independientes, de tal forma que para  $i \geq 0$ :

- Las posturas limitadas de compra (venta) arriban a una distancia de  $i$  pujas de la mejor postura contraria de acuerdo a distribuciones exponenciales independientes con tasa  $\lambda(i)$
- La llegada de las posturas a mercado siguen distribuciones exponenciales independientes con tasa  $\mu$
- La cancelación de posturas a una distancia de  $i$  pujas de la mejor postura contraria sucede de acuerdo a una distribución exponencial donde la tasa es proporcional al número de órdenes activas, es decir, si a cierto nivel existe un número  $x$  de posturas activas, la tasa de cancelación es  $\theta(i)x$
- Los eventos mencionados anteriormente son independientes

De este forma se puede decir que el proceso  $X$  es una cadena de Markov en tiempo continuo, con el espacio de estados  $\mathbb{Z}^n$  con las siguientes tasas de transición:

- $x \rightarrow x^{p-1}$  con tasa  $\lambda(p_A(t) - p)$  para  $p < p_A(t)$
- $x \rightarrow x^{p+1}$  con tasa  $\lambda(p - p_B(t))$  para  $p > p_B(t)$
- $x \rightarrow x^{p_B(t)+1}$  con tasa  $\mu$
- $x \rightarrow x^{p_A(t)-1}$  con tasa  $\mu$
- $x \rightarrow x^{p+1}$  con tasa  $\theta(p_A(t) - p)|x_p|$  para  $p < p_A(t)$
- $x \rightarrow x^{p-1}$  con tasa  $\theta(p - p_B(t))|x_p|$  para  $p > p_B(t)$

### 5.3. Dirección de los Movimientos en el Precio

Se puede calcular la probabilidad de que en el siguiente movimiento el precio medio  $p_M(t)$  aumente. El precio medio se altera en el tiempo del primer paso de las colas al mejor precio de compra o venta a cero. También este precio se puede alterar si el “spread”  $p_S(t) > 1$  y llega una postura dentro de este “spread”. Definimos a  $X_A = X_{p_A(\cdot)}(\cdot)$  y  $X_B = X_{p_B(\cdot)}(\cdot)$  y

$$\theta = \inf\{t \geq 0, p_M(t) \neq p_M(0)\}.$$

Dada una configuración inicial del libro de posturas, la probabilidad de que en el siguiente movimiento el precio medio aumente se puede expresar de la siguiente forma:

$$P\{p_M(\theta) > p_M(0) | X_A(0) = a, X_B(0) = b, p_S(0) = S\}$$

Los procesos  $X_A$  y  $X_B$  son procesos de nacimiento y muerte con las siguientes tasas de transición:

$$n \rightarrow n + 1 \text{ con una tasa } \lambda(S)$$

$$n \rightarrow n - 1 \text{ con una tasa } \mu + n\theta(S)$$

En particular cuando  $S = 1$  el precio medio  $p_M(t)$  se altera cuando  $X_A$  ó  $X_B$  alcanzan el estado 0. Ahora, si se denota  $\sigma_A$  y  $\sigma_B$  como el tiempo del primer paso de los procesos  $X_A$  y  $X_B$  a cero, la distribución de  $\theta$  está dada por el mínimo de los tiempos del primer paso de los procesos  $X_A$  y  $X_B$ . La probabilidad de interés se puede expresar como  $P\{\sigma_A < \sigma_B | X_A(0) = a, X_B(0) = b, p_S(0) = S\}$ . La transformación de Laplace de la distribución condicional de  $\sigma_A - \sigma_B$  está dada por:

$$\hat{f}^A(s)\hat{f}^B(-s)$$

donde:

$$\hat{f}_{j,0}^Z(s) = - \left( \frac{1}{\lambda(S)} \right)^j \left( \prod_{i=1}^b \Phi_{k=i}^\infty \frac{-\lambda(S)(\mu + k\theta(S))}{\lambda(S) + \mu + k\theta(S) + s} \right)$$

Por lo que la probabilidad buscada se obtiene al evaluar la función de distribución acumulada en 0. Para hacer esto es necesario encontrar la transformación inversa de  $\hat{f}^A(s)\hat{f}^B(-s)$  e integrar esta función.

En el caso de que  $S > 1$ , es necesario considerar que si se recibe una postura dentro del spread el precio medio  $p_M(t)$  también se alterará. Por lo que si denotamos  $\sigma_A^i$  y  $\sigma_B^i$  como el tiempo en el que llega la primera orden a  $i$  pujas del mejor precio de venta o compra respectivamente. El tiempo en el que cambia por primera vez  $p_M(t)$  está dado por el mínimo de los tiempos  $\sigma_A, \sigma_B, \sigma_A^i$  y  $\sigma_B^i$  con  $i = 1, \dots, S - 1$ . Es importante mencionar que  $\sigma_A^i$  y  $\sigma_B^i$  se distribuyen de manera exponencial con tasa  $\lambda(i)$ . Para que  $p_M(t)$  aumente

es necesario que arribe una orden de compra a  $S - 1$  pujas del mejor precio de venta o se agoten las posturas al mejor precio de venta antes de que llegue una postura de venta a  $S - 1$  pujas de la mejor postura de compra o se agoten las posturas al mejor precio de compra.

En este caso la probabilidad buscada está dada por  $P\{\sigma_A \wedge \sigma_B^1 \wedge \dots \wedge \sigma_B^{S-1} < \sigma_B \wedge \sigma_A^1 \wedge \dots \wedge \sigma_A^{S-1} | X_A(0) = a, X_B(0) = b, p_S(0) = S\}$ . El mínimo de un conjunto de variables aleatorias que se distribuyen de forma exponencial con parámetros  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  tiene una distribución exponencial con parámetro  $\lambda_1 + \dots + \lambda_n$ . Por lo que podemos expresar la probabilidad de interés de la siguiente forma  $P\{\sigma_A \wedge \sigma_B^\Sigma < \sigma_B \wedge \sigma_A^\Sigma | X_A(0) = a, X_B(0) = b, p_S(0) = S\}$ . Por lo que la transformación de Laplace de la función de densidad de  $\sigma_A \wedge \sigma_B^\Sigma - \sigma_B \wedge \sigma_A^\Sigma$  está dada por:

$$\left( \hat{f}^A(\Lambda + s) + \frac{\Lambda}{\Lambda + s}(1 - \hat{f}^A(\Lambda + s)) \right) \left( \hat{f}^B(\Lambda + s) + \frac{\Lambda}{\Lambda + s}(1 - \hat{f}^B(\Lambda + s)) \right)$$

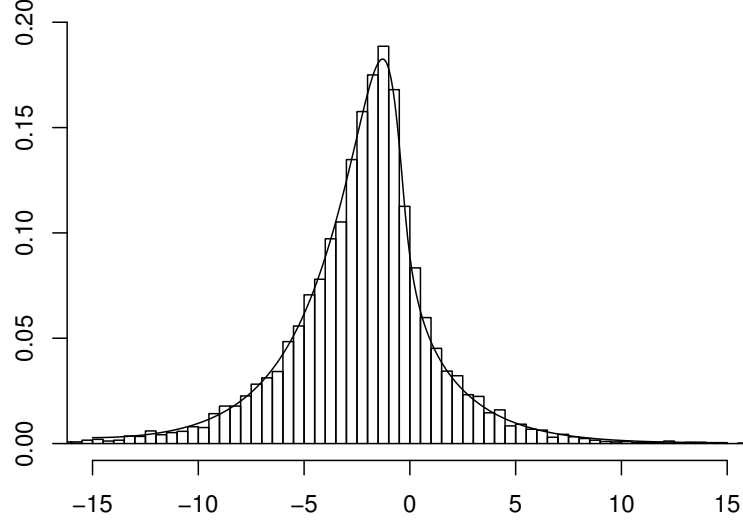
donde  $\Lambda = \sum_{i=1}^{S-1} \lambda(i)$ . De igual forma es necesario encontrar la transformación, integrar la función y evaluar en 0.

Los métodos para invertir la transformación de Laplace discutidos en la sección anterior están diseñados para la transformación unilateral de Laplace, es decir definida en los reales positivos. La distribución de  $\sigma_A \wedge \sigma_B^\Sigma - \sigma_B \wedge \sigma_A^\Sigma$  están definidas en todos los reales, por lo que es necesario utilizar algunas herramientas para poder encontrar la transformación inversa.

Es importante tener presente que el método utilizado para encontrar la transformación inversa presentado en este trabajo está basado en la expansión en series de Fourier, el cual utiliza funciones pares. Además es importante notar que el método permite encontrar la transformación inversa para  $t \in (0, T)$ . Las funciones de densidad estudiadas no son pares y están definidas para  $t < 0$  por lo que para resolver este problema definimos la función  $g(t) = f(t - a)$ , donde  $a$  es tal que:

$$\lim_{t \rightarrow 0^-} g(t) = 0$$

En este caso se realizaron diversas simulaciones de los procesos  $X_A$  y  $X_B$  para evaluar la distribución de  $\theta$ , la cual disminuye exponencialmente de ambos lados a partir de un cierto máximo. En la Figura 10 se muestra el resultado que se obtiene de las simulaciones y el que se obtiene al utilizar el método de la transformación inversa de Laplace.



**Figura 10:** Función de densidad de  $\theta$

Si definimos a  $u(t)$  como la función de escalón unitario, es decir:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & \text{si } x < 0 \\ 1, & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$$

debido a las propiedades de la transformación de Laplace:

$$\mathcal{L}\{g(t)u(t-a)\} = \mathcal{L}\{f(t-a)u(t-a)\} = e^{-as}\hat{f}(s)$$

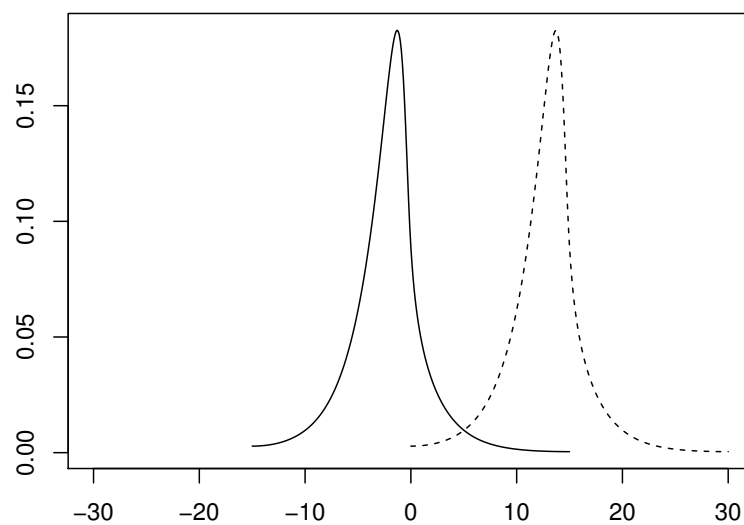
por lo que de esta forma podemos desplazar la función de densidad de forma que  $\lim_{t \rightarrow 0^-} g(t) = 0$ , como se puede apreciar en la Figura 11.

También es importante utilizar el parámetro correcto  $T$  para encontrar la distribución correcta. Como se puede ver en la Figura 12, la función de densidad es radicalmente distinta cuando  $T$  no es lo suficientemente grande.

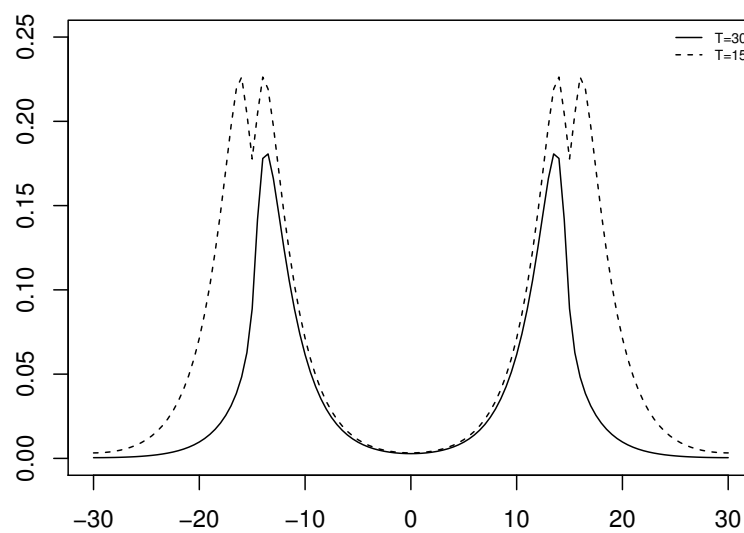
### 5.3.1. Estimación de los Parámetros

Debido a que el modelo considera posturas con un volumen estandarizado o único, es necesario encontrar el promedio de las posturas limitadas  $S_l$ , posturas





**Figura 11:** Función de densidad de  $\theta$



**Figura 12:** Función de densidad de  $\theta$

a mercado  $S_m$  y de las cancelaciones  $S_c$ . Con esto se estima la tasa de llegada de las ordenes limitadas  $\lambda$  a una distancia de  $i$  pujas,  $1 \leq i \leq 5$

$$\hat{\lambda}(i) = \frac{N_l(i)}{T_*}$$

donde  $N_l(i)$  es el número de posturas que llegaron a una distancia  $i$  de la mejor postura contraria y  $T_*$  es el tiempo total en el que el mercado estuvo abierto expresado en minutos. Para  $i > 5$  esto se extrapola siguiendo la siguiente ley de potencias:

$$\hat{\lambda}(i) = \frac{k}{i^\alpha}$$

La tasa de llegada de las posturas a mercado  $\mu$  se estima de la siguiente forma:

$$\hat{\mu} = \frac{N_m S_m}{T_* S_l}$$

$N_m$  es el número de posturas de mercado; en este caso se consideran como posturas de mercado todas aquellas que superan la mejor postura contraria.

En trabajos anteriores no se cuenta con información tan detallada del libro de posturas, por lo que no se han considerado las modificaciones que en este caso forman una parte muy importante de la muestra. El promedio del volumen de las modificaciones para BIMBO es casi 10 veces mayor al de las nuevas posturas. Esto se puede deber a que los participantes del mercado que están interesados en comprar o vender un volumen mayor seguramente lo harán a través de posturas limitadas, ya que son más sensibles al precio. Las posturas limitadas garantizan un precio, mientras que a través de una postura a mercado se garantiza la ejecución pero no el precio. Los participantes con posturas de gran volumen se verán obligados a adaptar el precio de sus posturas a través de modificaciones para lograr la ejecución de las mismas. Existen tres alternativas:

- Considerar las modificaciones como una cancelación y una nueva postura
- Ignorar las modificaciones
- Modelar las modificaciones como otro proceso

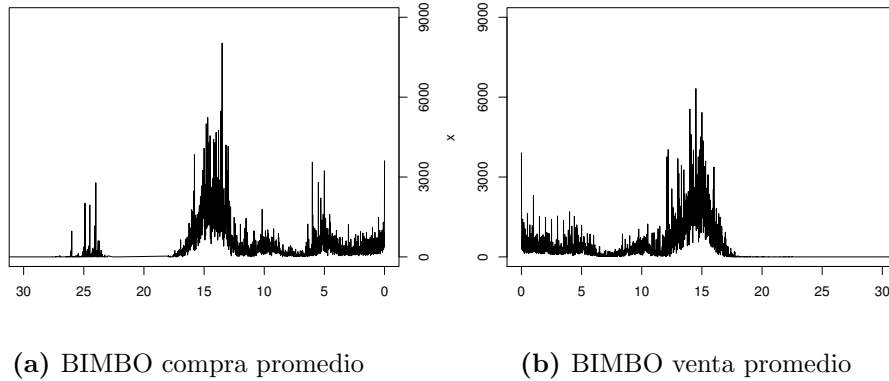
La primera alternativa es la que más se acerca a estudios anteriores ya que estos no cuentan con la noción de las modificaciones, al tener la información

de las puntas del libro de posturas sólo notan la cancelación de una postura y la aparición de una nueva a otro nivel. No se considera la diferencia en el volumen de las nuevas posturas y de las modificaciones. Por ejemplo, en la acción de BIMBO el volumen de las nuevas posturas limitadas de compra es de 2,005.23. Mientras que si se toman en conjunto las nuevas posturas y las modificaciones el promedio del volumen es de 10,518.09. Esto se debe a que el promedio del volumen de las modificaciones de compra es de 27,237.23. La segunda alternativa no es viable ya que hay un gran número de modificaciones, al ignorarlas se descartaría información importante en el modelo. La tercera alternativa le agrega un poco de complejidad al modelo, ya que es necesario modelar de alguna forma la llegada de las modificaciones y el comportamiento de ellas. En este caso se optará por la primera alternativa.

Finalmente para calcular los parámetros de cancelación  $\theta(i)$ , es necesario calcular el libro promedio. En la Figura 13 se encuentra el libro promedio para BIMBO. Bajo los supuestos del modelo, el número de cancelaciones depende del número de órdenes activas. Si definimos  $Q_i^A$  y  $Q_i^B$  como el número promedio de órdenes activas a  $i$  pujas de la mejor postura de venta y compra respectivamente,  $\theta(i)$  para  $1 \leq i \leq 5$  se pueden calcular de la siguiente forma, donde  $Q_i$  es el promedio de  $Q_i^A$  y  $Q_i^B$ :

$$\hat{\theta}(i) = \frac{N_c(i)S_c}{Q_i T_*}$$

$N_c(i)$  es el número de posturas de cancelación a una distancia  $i$  de la mejor postura contraria. Para  $i > 5$ ,  $\hat{\theta}(i) = \hat{\theta}(5)$ .



**Figura 13:** Libro Promedio

Al realizar los cálculos antes descritos para la emisora BIMBO se obtienen los siguientes parámetros:

**Tabla 7:** Parámetros del Modelo

	1	2	3	4	5
$\lambda(i)$	0.1669	0.0732	0.0655	0.0601	0.0731
$\theta(i)$	0.6480	0.9954	1.3240	1.5714	0.7582
$\mu$	0.1438				

### 5.3.2. Resultados

Para entender los resultados en primer lugar, es necesario obtener las probabilidades empíricas para compararlas con las obtenidas por el modelo. En este caso, se eligió la acción de BIMBO, en particular los casos donde  $S = 1$ , es decir, la distancia de la mejor postura de compra a la mejor postura de venta es de 1 puja. Para el caso de BIMBO, existen 21,256 eventos donde  $S = 1$  de los 173,616 eventos que sucedieron en los 68 días de estudio.

**Tabla 8:** Ejemplo: Posturas BIMBO

id	timestamp	$p_B(t)$	$X_{p_B}(t)$	$p_A(t)$	$X_{p_A}(t)$	$S$	$p_M(t)$
151	1289919878430	97.79	600	97.8	2100	1	97.7950
152	1289919878450	97.79	600	97.8	2100	1	97.7950
153	1289919882930	97.79	600	97.8	1500	1	97.7950
154	1289919882940	97.79	600	97.8	1500	1	97.7950
155	1289919883070	97.75	39000	97.79	900	4	97.7700

Para analizar los resultados, se considerará la primera postura donde  $S = 1$ , en el ejemplo de la Tabla 8 esto sucede en el renglón 151, donde  $p_M(t)$  es 97.7950 y el volumen de la mejor postura de venta excede el de la mejor postura de compra. Los siguientes eventos modifican posturas distintas a las puntas o el volumen en las puntas, hasta el evento 155 donde se modifica  $p_M(t)$ .

Para la acción de BIMBO existen 2,196 instancias como esta; para poder realizar el análisis se encontró la media del volumen del primer evento de cada instancia donde  $S = 1$ , la cual es de 2,707.45. El volumen de todos los eventos se dividió entre la media y se tomó el número entero más cercano mayor a este cociente para realizar los cálculos. Para el análisis se consideran las posturas

donde el volumen normalizado es menor o igual a 5. De las 2,196 instancias mencionadas antes 2,043 cumplen esto, éstas se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9:** Número de Posturas

compra	venta				
	1	2	3	4	5
1	1,217	253	116	59	5
2	193	23	9	4	1
3	62	3	4	1	1
4	39	4	0	0	0
5	15	1	0	0	0

En la Tabla 10 se encuentran los resultados que se obtuvieron. En los casos donde existen el mismo número de posturas de compra que de venta los resultados no son muy claros, ya que sólo en el 39.93 % y 34.78 % para 1 y 2 posturas respectivamente aumenta el precio; se esperaría un número cercano al 50 %. Sin embargo, los resultados sí reflejan algo que se esperaría, en los casos donde el número de posturas de compra es mayor al número de posturas de venta la probabilidad de un aumento de precio es mayor; al aumentar esta diferencia aumenta también la probabilidad de que el precio suba. Muchas de las combinaciones son poco concluyentes, ya que la muestra es muy pequeña.

**Tabla 10:** Resultados Empíricos

compra	venta				
	1	2	3	4	5
1	39.93 %	11.86 %	9.48 %	11.86 %	2.63 %
2	60.62 %	34.78 %	11.11 %	50.00 %	0.00 %
3	67.74 %	33.33 %	75.00 %	0.00 %	100.00 %
4	76.92 %	25.00 %	-	-	-
5	93.33 %	0.00 %	-	-	-

Los resultados obtenidos al aplicar el método de la transformación de Laplace siguen una tendencia similar como se puede ver en la Tabla 11. En este caso cuando el número de órdenes de compra es el mismo al de las de venta, la probabilidad de un aumento en  $p_M(t)$  es cercana al 50 %. Cuando el número de posturas de compra excede al de venta existe una mayor probabilidad de que el precio suba para todos los casos; también al aumentar la diferencia entre las posturas de compra y venta aumenta la probabilidad de un aumento en el precio. Un resultado interesante es que se

esperaría que  $P\{p_M(T) > p_M(0)|X_A(0) = a, X_B(0) = b, p_S(0) = 1\} = 1 - P\{p_M(T) > p_M(0)|X_A(0) = b, X_B(0) = a, p_S(0) = 1\}$ , sin embargo, en este caso  $P\{p_M(T) > p_M(0)|X_A(0) = 1, X_B(0) = 2, p_S(0) = 1\} = 69.31\%$  mientras que  $P\{p_M(T) > p_M(0)|X_A(0) = 2, X_B(0) = 1, p_S(0) = 1\} = 35.32\%$ . Esto se puede deber a la precisión de algunos de los cálculos que se realizaron, en particular las integraciones numéricas; esto se podría mejorar al alterar los parámetros.

**Tabla 11:** Resultados Transformación de Laplace

compra	venta				
	1	2	3	4	5
1	53.49 %	35.32 %	26.21 %	20.82 %	17.27 %
2	69.31 %	52.28 %	41.79 %	34.75 %	29.73 %
3	77.16 %	62.26 %	52.02 %	44.60 %	39.01 %
4	81.81 %	68.80 %	59.22 %	51.91 %	46.17 %
5	84.89 %	73.42 %	64.55 %	57.52 %	51.85 %

Con los mismos parámetros que se utilizaron para el método de Laplace se realizaron simulaciones. Para cada una de las combinaciones se realizaron 10,000 simulaciones. Para las simulaciones en los casos donde el número de posturas de compra y venta son iguales, el porcentaje de las ocasiones donde el precio sube es el más cercano al 50 %. También en este método se cumplen las premisas que se establecieron en los otros dos métodos en cuanto al aumento de la probabilidad de que el precio suba dada la diferencia entre el número de posturas de compra y venta. En este caso se podría decir que  $P\{p_M(T) > p_M(0)|X_A(0) = a, X_B(0) = b, p_S(0) = 1\} = 1 - P\{p_M(T) > p_M(0)|X_A(0) = b, X_B(0) = a, p_S(0) = 1\}$  sí se cumple. Este método resulto ser bastante más rápido que el método de la transformación inversa de Laplace, sin embargo, probablemente el método de Laplace se podría mejorar considerablemente si se optimizaran algunos de los algoritmos utilizados.

**Tabla 12:** Resultados Simulación

compra	venta				
	1	2	3	4	5
1	49.85 %	33.23 %	25.10 %	19.71 %	16.29 %
2	66.78 %	50.26 %	40.35 %	33.20 %	28.28 %
3	75.55 %	60.08 %	50.41 %	42.41 %	36.89 %
4	79.55 %	66.27 %	57.13 %	49.40 %	43.76 %
5	83.90 %	71.98 %	63.65 %	55.75 %	50.59 %

## 6. Conclusiones

En el trabajo se reconstruyó el libro de posturas de la Bolsa Mexicana de Valores, el algoritmo logró reproducir con gran eficacia los hechos reportados por la BMV, medidos desde el punto de vista del volumen y del VWAP.

Se compararon los resultados obtenidos con los análisis que se han realizado para otros mercados. Para algunas de las variables los resultados fueron similares a los encontrados en otros mercados; por ejemplo los precios siguen una ley de potencias. También se puede decir que el volumen de las órdenes sigue la ley de potencias, sin embargo, las cancelaciones no tienen un comportamiento similar. La mayoría de las cancelaciones suceden cerca de las puntas.

En el trabajo se describió un modelo del libro de posturas simplificado, el cual clasifica las órdenes en: órdenes limitadas, de mercado y cancelaciones, a las cuales les asigna una distinta tasa de llegada. El modelo tiene la bondad de permitir el cálculo de algunos resultados a través de la transformación inversa de Laplace, la cual facilita los mismos debido a sus propiedades.

El trabajo se concentró en describir el comportamiento de los movimientos del precio. Para realizar los cálculos necesarios se utilizó el método de Laplace y una expresión de la probabilidad buscada en términos de fracciones continuas. Para realizar los cálculos fue necesario estimar los parámetros. Para poder comparar los resultados obtenidos a través del método de Laplace, se realizaron los cálculos de las frecuencias empíricas y a través de simulación.

En particular se calculó la probabilidad de un aumento en el precio cuando el “spread” es de una puja; las frecuencias empíricas muestran algunas diferencias con los resultados obtenidos a través de la transformación de Laplace y simulación, sin embargo los resultados eran consistentes con los que se esperaban; al aumentar la diferencia entre las posturas de compra y venta, aumenta la probabilidad de que aumente el precio. El método de la transformación de Laplace resultó ser significativamente más lento que las simulaciones.

En trabajos futuros en primer lugar se podría probar el método de la transformación inversa en casos donde el “spread” es mayor que 1, para estos casos podría ser que este método fuera más veloz que la simulación. También se deja para un trabajo posterior la implementación de estrategias para explotar los resultados encontrados en el trabajo. Para implementar estas estrategias es necesario en primer lugar optimizar los algoritmos utilizados en este trabajo.



El algoritmo de la transformación de Laplace utilizada en el trabajo, utiliza los mismos resultados en varias ocasiones, por lo que estos se podrían almacenar para evitar calcularlos en cada ocasión.

El modelo utilizado también puede perfeccionado; en particular se podría eliminar el supuesto de órdenes de un tamaño unitario o estándar. También se podrían utilizar distintos parámetros para las órdenes de compra y venta.

## Índice de tablas

1.	Posturas Iniciales . . . . .	6
2.	Registro de Posturas . . . . .	6
3.	Distribución de Precios de las Posturas de Compra . . . . .	15
4.	Distribución de Precios de las Posturas de Venta . . . . .	15
5.	Distribución del Volumen de las Posturas . . . . .	17
6.	Distribución de las Cancelaciones de las Posturas . . . . .	17
7.	Parámetros del Modelo . . . . .	35
8.	Ejemplo: Posturas BIMBO . . . . .	35
9.	Número de Posturas . . . . .	36
10.	Resultados Empíricos . . . . .	36
11.	Resultados Transformación de Laplace . . . . .	37
12.	Resultados Simulación . . . . .	38

## Índice de figuras

1.	Captura de pantalla de la Interfaz desarrollada en Java . . . . .	9
2.	Reconstrucción: KUO diciembre 31 . . . . .	11
3.	Reconstrucción: KUO enero 28 . . . . .	11
4.	Reconstrucción: AMX enero 20 . . . . .	12
5.	Reconstrucción: AMX diciembre 28 . . . . .	12
6.	Ajuste del Modelo de Distribución de Precios de las Posturas .	14
7.	Ajuste del Modelo de Distribución del Volumen de las Posturas	16
8.	Ajuste del Modelo de Distribución de las Cancelaciones de las Posturas . . . . .	18
9.	Funciones $g_n(t)$ . . . . .	24
10.	Función de densidad de $\theta$ . . . . .	31
11.	Función de densidad de $\theta$ . . . . .	32
12.	Función de densidad de $\theta$ . . . . .	32
13.	Libro Promedio . . . . .	34

## Bibliografía

- [1] *Inside the NYSE: The Specialist*, <http://www.nyse.com/pdfs/specialistmagarticle.pdf>.
- [2] Maureen O’Hara, *Market microstructure theory*, Blackwell Business, John Wiley & Sons, 1995.
- [3] I. Zovko and J.D. Farmer, *The power of patience: a behavioural regularity in limit-order placement*, *Quantitative Finance* **2** (2002), no. 5, 387–392.
- [4] Jean-Philippe Bouchaud, Marc Mézard, and Marc Potters, *Statistical properties of stock order books: empirical results and models*, *Quantitative Finance* **2** (2002), no. 4, 251–256.
- [5] J. Abate and W. Whitt, *Computing laplace transforms for numerical inversion via continued fractions*, *INFORMS Journal on Computing* **11** (1999), no. 4, 394–405.
- [6] H. Dubner and J. Abate, *Numerical inversion of laplace transforms by relating them to the finite fourier cosine transform*, *Journal of the ACM (JACM)* **15** (1968), no. 1, 115–123.
- [7] J. Abate and W. Whitt, *Numerical inversion of laplace transforms of probability distributions*, *ORSA Journal on Computing* **7** (1995), no. 1, 36–43.
- [8] Rama Cont, Sasha Stoikov, and Rishi Talreja, *A stochastic model for order book dynamics*, *Operations Research* **58** (May/June 2010), no. 3, 549–563.