



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
VALPARAÍSO – CHILE



HIGH FREQUENCY TRADING & GRAPHICS PROCESSING UNIT

Tesis presentada como requerimiento parcial
para optar al grado académico de

INGENIERO CIVIL

por

Jonathan Andrés Antognini Cavieres

Comisión Evaluadora:

Dr. Luis Salinas Carrasco (Guía, UTFSM)

Dr. Héctor Allende Olivares (UTFSM)

MARZO - 2013

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
VALPARAÍSO – CHILE

TÍTULO DE LA TESIS:

HIGH FREQUENCY TRADING & GRAPHICS PROCESSING UNIT

AUTOR:

JONATHAN ANDRÉS ANTOGNINI CAVIERES

Tesis presentada como requerimiento parcial para optar al grado académico de **Ingeniero Civil** de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Profesor Guía:

Dr. Luis Salinas Carrasco

Profesor Correferente

Dr. Héctor Allende Olivares

Marzo - 2013.
Valparaíso, Chile.

A mi familia

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Mercados Financieros	2
1.1.1. Mercados bursátiles	3
1.2. Series de tiempo financiera	4
1.2.1. Descripción de serie financiera	4
1.2.2. High frequency trading	6
1.3. High Performance Computing	7
1.3.1. Graphics Processing Unit	7
1.4. Motivación	8
1.5. Organización de la Memoria	9
2. Estado del arte	10
2.1. Modelos de pronósticos clásicos	10
2.1.1. Lineales	10
2.1.1.1. Estacionalidad	10
2.1.1.2. Auto Regressive (AR)	10
2.1.1.3. Moving Average (MA)	10
2.1.1.4. Auto Regressive Moving Average (ARMA)	11
2.1.1.5. Auto Regressive Integrated Moving Average (ARIMA)	11
2.1.2. Volatilidad	11
2.1.2.1. Auto Regressive Conditional Heteroskedasticity (ARCH)	11
2.1.2.2. Generalized Auto Regressive Conditional Heteroskedasticity (GARCH)	11
2.1.3. No Lineales	11

2.1.4. Taylor series expansion (bilinear models)	11
2.1.5. Threshikd autoregressive model	11
2.1.6. Markov switching model	11
2.1.7. Nonparametric estimation	11
2.1.8. Neural networks	11
2.2. Modelos de pronóstico multiresolución	11
3. Descripción del problema	12
3.1. Descripción histórica	12
3.2. Descripción y formalización a usar	12
4. Solución propuesta	13
4.1. Algoritmo y fundamentos teóricos	13
5. Estudio experimental	14
5.1. Selección de data (sector, frecuencia)	14
5.2. Parámetros del algoritmo	14
5.3. Validación	14
5.4. Speed up: multicore, gpu, híbrido	14
6. Conclusiones	15
Bibliography	16

Capítulo 1

Introducción

A través de los años el hombre ha presentado un cambio radical en su nivel de vida; los conocimientos que él ha logrado acumular y aplicar han sido para su beneficio, y han cambiado radicalmente su modo de vivir. Existe una notable diferencia entre el hombre de hace unas cuantas décadas y el hombre moderno, tal diferencia se ha dado por el desarrollo de la ciencia, que está estrechamente relacionada con la innovación tecnológica. Por esta razón se amplía el contenido de cómo ha evolucionado la ciencia y la tecnología en el mundo, su origen remoto, los países que más han aportado en esta área y su respectiva utilización, bien sea para el desarrollo o la destrucción.

Como se sabe, la tecnología se está haciendo presente en todas y cada una de las áreas de investigación, como física, química, biología, computación, y lo que es de interés para este documento es el área de los mercados financieros.

Esta memoria está enfocada a abordar un problema financiero, relacionado con las series financieras de alta frecuencia y una forma particular de poder realizar pronósticos tomando en cuenta distintas características de naturaleza propia de este tipo de datos. Se pretende abordar esta problemática con metodologías computacionales, aplicando algunos conceptos matemáticos útiles para esta área. El problema es de carácter financiero, por lo que es necesario contextualizar el tema mediante conceptos, criterios y términos generales asociados al área.

Este capítulo tiene como objetivo introducir los conceptos de series de tiempo financieras, sus orígenes y la alta frecuencia.

1.1. Mercados Financieros

El mercado financiero es un espacio con marco institucional que permite poner en contacto a oferentes y demandantes para que efectúen transacciones financieras. La idea de mercado como foro organizado a la que acuden agentes económicos para efectuar transacciones queda reducida en el mundo financiero como las bolsas de valores [ME06].

El concepto de mercado financiero se utiliza en general para referirse a cualquier mercado organizado en el que se negocien instrumentos financieros de todo tipo, como por ejemplo, acciones. Además, el espacio para generar estas interacciones no necesariamente debe ser físico. Por otro lado el negociar instrumentos financieros implica a grandes rasgos: intercambiar instrumentos financieros, y definir su precio. Por ende, estos mercados están basados en las fuerzas de oferta y demanda, ubicando a todos los oferentes en el mismo lugar para facilitarle la búsqueda a los demandantes. Dentro de este tipo de mercado se distinguieron bloques de estudio en la economía moderna [JS84].

Una de las razones que hace importante este tipo de mercado, es su funcionalidad, ya que permiten por un lado aumentar el capital, siendo esto uno de los casos favorables, ya que también hay probabilidades considerables de disminuir el capital; comercio internacional, como en los mercados de divisas, por ejemplo Forex; y reunir a quienes necesitan recursos financieros, con los que tienen recursos financieros. Factores claves que permiten generar los efectos de oferta y demanda.

En este tipo de mercado se definen los siguientes términos [NSS03]:

- *Dealer*: Un dealer es un ente presente en los mercados que está dispuestos a comprar o vender.
- *Orders*: Operación de compra/venta de activos.
- *Bid price*: Precio al cual un *dealer* está dispuesto a comprar.
- *Ask price*: Precio al cual un *dealer* está dispuesto a vender.
- *Market orders*: instrucción del cliente al dealer, comprar o vender al mejor precio posible dentro de los valores actuales del mercado. Esto asegura la realización de la transacción, pero no el precio.
- *Limit orders*: es una orden para comprar a un valor máximo (precio determinado), o para vender a un valor mínimo (precio determinado). Esto le da al cliente el control

sobre el precio al que se ejecuta el comercio, sin embargo, no garantiza la realización de la transacción.

El conjunto de *Limit orders* forman los *books* para cierto activo, los cuales proveen información detallada de dicho instrumento. Con estos datos se forman los llamados bid-ask spreads, que es la diferencia entre el precios cotizados para una venta inmediata (oferta) y una compra inmediata (bid). También se generan los bid-ask quote, el cual define cotas para el precio de transacción.

1.1.1. Mercados bursátiles

Los mercados bursátiles están clasificados en los mercados de capitales, en donde se negocian activos financieros. Este tipo de mercado provee financiamiento por medio de la emisión de acciones y permiten luego el intercambio de estas. La aplicación más directa de este tipo de mercados, son las bolsas de valores, cuyo origen se remonta a finales del siglo XV en las ferias medievales de Europa.

Las bolsas de valores se pueden definir como mercados organizados y especializados, en los que se pueden realizar transacciones de títulos de valores por medio de intermediarios autorizados. Estas bolsas ofrecen al público y a sus miembros facilidades, mecanismos e instrumentos técnicos que facilitan la negociación de títulos de valores susceptibles de ofertas públicas, a precios determinados mediante subasta.

La principal función de las Bolsas de Valores implican proporcionar a los participantes información objetiva, completa y permanente de los valores y las empresas inscritas en la bolsa, sus emisiones y las operaciones que en ella se realicen, supervisión de actividades. Las componentes de este sistema son los activos, instituciones financieras cuya misión es contactar demandantes y oferentes en los mercados donde se negocian los diferentes instrumentos o activos financieros.

Dentro de los estudios de la economía, se habla de que este tipo de mercado es de competencia perfecta, ya que posee características como: elevado número de compradores y vendedores. La decisión individual de cada uno de ellos ejercerá escasa influencia sobre el mercado global; Homogeneidad de los productos, es decir, no existen diferencias entre productos que venden los oferentes; Transparencia del mercado, todos los participantes tienen pleno conocimiento de las condiciones generales en que opera el mercado; Libertad de entrada y salida de empresas, todos los participantes, cuando lo deseen, podrán entrar o salir del mercado a costos nulos o casi nulos [Man11]. Sin embargo, han existido varios estudios asociados a la Hipótesis del Mercado Eficiente, la cual dice que cuando los

mercados financieros son eficientes, son capaces de trasladar a los precios de los activos, en cualquier momento, todos los datos relevantes de esos activos, es decir, que el precio de esos activos refleja en todo momento toda la información disponible sobre todos los valores y lo hace de manera insesgada. Este término lo propuso Eugene Fama en el año 1970, para y se refirió a los procesos aleatorios que se comportan como juegos justos, cuyos resultados no pueden ser predichos sistemáticamente.

1.2. Series de tiempo financiera

En la vida real, la mayoría de los fenómenos que se estudian secuencialmente, deben tomar en cuenta la dinámica de los proceso con la finalidad tener una comprensión holística del proceso. Una herramienta útil en dicho objetivo es el análisis de series de tiempo. Se pueden presentar casos de series de tiempo en una multitud de disciplinas como ingeniería, sociología, economía, finanzas por solo mencionar algunas de ellas.

El propósito fundamental es mostrar las técnicas que permitan hacer inferencias del proceso en estudio incluyendo su predicción. Esto se logra estableciendo modelos probabilísticos hipotéticos que representen a los datos; y en consecuencia, se lleva a cabo el proceso de ajuste que incluye desde la estimación hasta la predicción una vez que se determina un modelo satisfactorio. Los modelos de series deben considerar la naturaleza del fenómeno y determinar los factores que pueden ser incluidos en los modelos.

En particular, el análisis de una series de tiempo financiera se refiere a la teoría y práctica de la valoración de activos en el tiempo, intentando modelar la incertidumbre generada por las características propias del fenómeno. Tanto la teoría económica y sus series temporales contienen un elemento de incertidumbre [Tsa05].

Las características diferenciadoras han propiciado numerosos trabajos en las áreas de econometría y economía financiera desde los años 60. Así, en el área financiera las evidencias sobre estructuras ha conducido a la formulación de distintos modelos matemáticos que se estudiarán en esta memoria.

1.2.1. Descripción de serie financiera

Las series de tiempo financieras como se dijo previamente, se basan en el estudio del precio de un activo financiero en el tiempo. Pero existen varios tipos de precios que se pueden lograr estudiar. Por un lado están los indicadores que se estudiaron en los primeros estudios formales en esta área, llamados estudios técnicos, los cuales mostraban

información al respecto de los precios: *apertura, cierre, el más bajo, el más alto, promedio*. Esos datos lógicamente estaban orientados a tomar métricas respecto a la frecuencia *día*, con estos datos quedaban gráficos como el siguiente:



Figura 1. Información de los precios de microsoft en la bolsa. Tomada desde <http://www.stockrageous.com/>.

Esos precios son a nivel diario, ya que los estudios en esos tiempos estaban orientados a eso, como los flujos de caja, o análisis gráficos. Sin embargo la data estudiada actualmente corresponde a data *intra diaria*, la cual reside en los valores específicos en que se compró/vendió algún activo, ya sea acción, divisa, etc. Ese término se conoce como el *last price*, y corresponde al valor específico con el cual se transó el activo. La forma de como se realiza este evento es básicamente como el que se detalló anteriormente, es decir, mediante *market* o *limit orders*, por lo que existe una cola de compras/ventas obtenidas mediante los *limit orders* y que cuando se cumpla la condición asociada (de vender o comprar a cierto precio), se realiza la transacción y se registra dicho *last price*; y por otro lado, si se entra a comprar/vender directamente mediante una *market order* también se registra dicho valor. Juntando toda esa información entonces, se puede generar una secuencia temporal de los *last prices*. Tomando en cuenta la alta frecuencia de estos datos, se torna muy complicado manejarlo de forma humana, es por esta razón que es necesario realizar análisis cuantitativos usando computadores.

A través de la historia, estas interacciones se realizaban personalmente en las bolsas de comercio, sin embargo con el avance de las tecnologías, se han implementado distintas

plataformas de *trading electrónico*: un método de negociación de valores (como acciones y bonos), divisas o derivados financieros por medios electrónicos. Esta tecnología de la información se utiliza para reunir a compradores y vendedores a través de la plataforma de comercio electrónico y las redes para crear lugares virtuales del mercado, como por ejemplo: National Association of Securities Dealers Automated Quotation (NASDAQ), New York Stock Exchange (NYSE), etc.

Las series financieras tienen características singulares en relación a otras series macroeconómicas, como son:

- Frecuencia: la mayor frecuencia en la observación de los datos es mayor que en otro tipo de series de tiempo, llegando incluso a unidades de fracciones de segundos.
- Heterocedasticidad: ocurre cuando la varianza de las perturbaciones no es constante a lo largo de las observaciones. Este factor hace inadecuados los modelos desarrollados para series estacionarias.
- No estacionalidad: en muchos casos la media y varianza se presentan como no estacionarias.
- Información oculta: se pueden encontrar distintos tipos de patrones a diferentes niveles de escala.

1.2.2. High frequency trading

Con el paso del tiempo y la implementación de distintos sistemas de trading electrónico, la frecuencia de la data creció de manera orbitante. En estos sistemas se define un *Tick*, como unidad atómica de información de un mercado financiero, particularmente sobre un activo determinado. Esta unidad especifica una gran cantidad de parámetros como la marca temporal, precio, cantidad transada, etc. Los datos de alta frecuencia son un conjunto de datos de reportes detallados sobre la actividad y movimiento efectuados sobre un activo. Se reúne la información de los ticks con cierto intervalo de tiempo, el cual para este tipo de series es variable, llegando incluso a tener ventanas de tiempo de fracciones de segundos. *Wei Sun*, señala en [eS07] que en la literatura acuñan distintos términos para referirse a este tipo de datos.

Los sistemas informáticos que realizan la labor de facilitar el comercio de instrumentos financieros, son los llamados *Electronic communication networks* (ECN). Se crearon en 1998, año que fueron autorizados por la *Securities and Exchange Commission*. La SEC es

una organización estadounidense creada en 1933 [Has04], y tiene la responsabilidad de velar por el cumplimiento de las leyes federales las bolsas de valores. Un caso emblemático, fue el 6 de mayo del 2010, fecha en la cual ocurrió el *Flash-Crash* [ALUG11], dio a lugar a una quiebra financiera estadounidense en el que el índice Dow Jones Industrial Average se desplomó un 9 %.

1.3. High Performance Computing

La capacidad de cómputo de los procesadores actuales ha incrementado de sobremedida, al igual que la cantidad de procesadores que tienen las tarjetas de video. Además, la naturaleza de los problemas que se están estudiando, como simulación de tsunamis, series de tiempo financiera, etc. Generan una gran cantidad de cómputo, por lo que es necesario optimizar y hacer más eficientes los algoritmos. Es por esto que nace el concepto de HPC que es el área de desarrollo que aplica computadores de alto rendimiento (clusters) a tareas que necesitan el procesamiento eficiente de métodos complejos o de grandes volúmenes de información. La idea de base consiste en dividir los problemas en subproblemas que se asignan a diferentes cores de un nodo o diferentes nodos de cálculo, coordinados por un nodo maestro mediante una red de alta velocidad.

1.3.1. Graphics Processing Unit

Las siglas GPU provienen de Graphics Processing Unit, o en español Unidad de procesamiento gráfico. Para efectos de hardware, la GPU funciona como coprocesador, pudiéndose utilizar de forma simultánea a la CPU y así aprovechar el potencial que puedan ofrecer ambas al mismo tiempo. Una GPU es un procesador diseñado para llevar a cabo cálculos necesarios implicados en la generación de gráficos, ya sea, para un video juego, o como para una aplicación que utilice gráficos en 2D, o 3D. Hoy en día las GPU son muy potentes y pueden incluso superar frecuencias de reloj de una CPU antigua.

Una GPU está formada por cientos de pequeños núcleos que trabajan juntos para procesar los datos de alguna aplicación. Esta arquitectura de procesamiento paralelo masivo es la que proporciona al GPU su alta capacidad de cálculo. Existen numerosas aplicaciones aceleradas en la GPU que brindan una forma rápida de acceder a la computación de alto desempeño (High Performance Computing). Durante los últimos años se han desarrollado nuevas tecnologías y arquitecturas que permiten sacar mayor provecho a sus capacidades [Owe07].

El concepto implícito en todo este tema es el paralelismo, que es una forma de computación en la cual varios cálculos pueden realizarse simultáneamente, siempre y cuando no existan dependencias secuenciales entre cálculos. Basándose en "divide y vencerás", principio que busca dividir los problemas grandes, para obtener varios problemas pequeños, que son posteriormente solucionados en paralelo.

La evolución de las tarjetas gráficas ha venido acompañado de un gran crecimiento en el mundo de los videojuegos y las aplicaciones 3D, realizándose grandes producciones de chips gráficos por parte de grandes fabricantes, como NVIDIA, AMD (ex ATI). Los recientes desarrollos sobre GPU abarcan distintas áreas de la ciencia, como problemas astrofísicos (n-body simulation), modelamiento molecular, computación financiera, etc. [KWm10]. En los últimos años también han aparecido conjuntos de herramientas y compiladores que facilitan la programación de las GPUs, como por ejemplo, NVIDIA CUDA, que cuenta con la comunidad más activa hasta la fecha en programación de GPUs.

1.4. Motivación

Las características que presentan las series financieras de alta frecuencia son un problema recurrente y el estudio en esta área se torna a veces complejo. Uno de los enfoques de solución para este tipo de problema es realizar predicción mediante el uso de descomposición Wavelet Multi-escala [BMSR06], y los resultados son alentadores. Este enfoque se ha utilizado en distintas áreas de la ciencia, y en particular en series financieras. Más en particular Zhang ha propuesto un modelo neural-wavelet [ZD01], mezclando redes neuronales con wavelet multiescala, los cuales llegan a buenas aproximaciones pero no logran competir en eficiencia temporal.

Los *objetivos principales* son:

- Implementar un modelo de predicción Neural-Wavelet basado en el modelo de Zhang y analizar su comportamiento con series financieras de alta frecuencia.
- Optimizar dichos algoritmos usando CPU y GPU para aumentar su rendimiento.

Los *objetivos secundarios*:

- Comparar los resultados de forma empírica con datos reales de la bolsa.
- Encontrar una combinación de carga para CPU y GPU que permita hacer más eficiente los cálculos.

1.5. Organización de la Memoria

Esta memoria se organizará con el siguiente esquema:

- Capítulo 2: Estado del arte: se estudiarán y repasarán las técnicas relativas a .
- Capítulo 3: Descripción formal del problema: se formalizará el problema a resolver, indicando las características consideradas.
- Capítulo 4: Solución propuesta: se definirá una propuesta de solución, con la respectiva metodología de implementación.
- Capítulo 5: Estudio experimental: se implementará y testeará la solución propuesta, comparando sus resultados.
- Capítulo 6: Conclusiones: se realizarán conclusiones generales del trabajo realizado y se detallarán posibles trabajos futuros.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Modelos de pronósticos clásicos

En este capítulo se estudiarán los modelos clásicos de pronóstico, y se subdividirán en métodos lineales y no lineales.

2.1.1. Lineales

2.1.1.1. Estacionalidad

2.1.1.2. Auto Regressive (AR)

Un modelo autorregresivo (AR) es un tipo de proceso aleatorio que se utiliza a menudo para modelar y predecir diversos tipos de fenómenos naturales. Este modelo es uno de un grupo de fórmulas de predicción lineal que tratan de predecir una salida de un sistema basado en las salidas anteriores.

2.1.1.3. Moving Average (MA)

Mientras los modelos AR estiman qué proporción de los datos del período pasado es probable que persistan en períodos futuros, los modelos MA se centran en cómo los datos futuros reaccionan a la innovación en los datos anteriores.

2.1.1.4. Auto Regressive Moving Average (ARMA)

2.1.1.5. Auto Regressive Integrated Moving Average (ARIMA)

2.1.2. Volatilidad

2.1.2.1. Auto Regressive Conditional Heteroskedasticity (ARCH)

2.1.2.2. Generalized Auto Regressive Conditional Heteroskedasticity (GARCH)

2.1.3. No Lineales

2.1.4. Taylor series expansion (bilinear models)

2.1.5. Threshikd autoregressive model

2.1.6. Markov switching model

2.1.7. Nonparametric estimation

2.1.8. Neural networks

2.2. Modelos de pronóstico multiresolución

Capítulo 3

Descripción del problema

3.1. Descripción histórica

3.2. Descripción y formalización a usar

Capítulo 4

Solución propuesta

4.1. Algoritmo y fundamentos teóricos

Capítulo 5

Estudio experimental

- 5.1. Selección de data (sector, frecuencia)
- 5.2. Parámetros del algoritmo
- 5.3. Validación
- 5.4. Speed up: multicore, gpu, híbrido

Capítulo 6

Conclusiones

Bibliografía

- [ALUG11] B. Arndt, M. Lutat, T. Uhle, and P. Gomber. High frequency trading. 2011.
- [BMSR06] D. Benaouda, F. Murtagh, J.L. Starck, and O. Renaud. Wavelet-based nonlinear multiscale decomposition model for electricity load forecasting. *Neurocomputing*, 70(1):139–154, 2006.
- [eS07] W. ei Sun. Quantitative methods in high-frequency financial econometrics: Modeling univariate and multivariate time series. 2007.
- [Has04] J. Hasbrouck. Economic and statistical perspectives on the dynamics of trade in securities markets. *Teaching Notes, Stern School of Business, New York University*, 2004.
- [JS84] M. Jensen and C. Smith. The theory of corporate finance: a historical overview. 1984.
- [Kir07] D. Kirk. Nvidia cuda software and gpu parallel computing architecture. In *International Symposium on Memory Management: Proceedings of the 6 th international symposium on Memory management*, volume 21, pages 103–104, 2007.
- [KWm10] D.B. Kirk and W.H. Wen-mei. *Programming massively parallel processors: a hands-on approach*. Morgan Kaufmann, 2010.
- [Man11] N.G. Mankiw. *Principles of economics*. South-Western Pub, 2011.
- [ME06] F.S. Mishkin and S.G. Eakins. *Financial markets and institutions*. Pearson Education India, 2006.
- [NSS03] Y. Nevmyvaka, K. Sycara, and D.J. Seppi. Electronic market making: Initial investigation. In *the Proceedings of Third International Workshop on Computational Intelligence in Economics and Finance*, 2003.
- [Owe07] J. Owens. Gpu architecture overview. In *ACM SIGGRAPH*, volume 1, pages 5–9, 2007.
- [Tsa05] R.S. Tsay. *Analysis of financial time series*, volume 543. Wiley-Interscience, 2005.

- [ZD01] B.L. Zhang and Z.Y. Dong. An adaptive neural-wavelet model for short term load forecasting. *Electric power systems research*, 59(2):121–129, 2001.