



UNIVERSIDAD DE GRANADA

PROYECTO FIN DE DOBLE GRADO EN INGENIERÍA
INFORMÁTICA Y MATEMÁTICAS

Una estrategia para bolsa basada en algoritmos evolutivos y su implementación en una plataforma de trading

Miguel Ángel Torres López

supervisado por
Prof. Jose Manuel Zurita López

12 de julio de 2019

Agradecimientos

A pesar del tema de trabajo,
me gustaría dar mi agradecimiento a la única
acción que no necesita ninguna predicción,
el apoyo de la familia.

Resumen

Aquí va el resumen del tfg en español y las palabras clave.

Abstract

Here lies the tfg's abstract in english and the key words.

Índice

1. Predicción en el mercado de valores	4
1.1. Precedentes en la predicción de bolsa.	5
1.2. Tipos de información extraíble a partir de árboles	6
1.2.1. Información total	6
1.2.2. Información de tendencias	7
1.2.3. Información de señales de compra y venta	8
2. Fundamentos de Bolsa	9
2.1. Mercado de valores	9
2.2. El valor de las acciones	9
2.3. Corredores de bolsa o brokers	11
2.4. Herramientas de simulación	11
2.4.1. MetaTrader5	11
2.4.2. Backtrader	12
2.4.2.1. Instalación	12
2.4.2.2. Preparación del entorno	13
2.4.2.3. La primera estrategia	14
2.4.3. Otras plataformas	17
2.5. Conseguir datos históricos para realizar backtesting	17
2.5.1. Quandl	17
2.5.2. YAHOO! Finance	18
3. Algoritmos genéticos	20
3.1. Definición	20
3.1.1. Población	21
3.1.2. Función fitness	21
3.1.3. Selección	22
3.1.4. Cruce	23
3.1.5. Mutación	24
3.2. Ejemplo de algoritmo genético con Pyvolution	25
4. Árbol de Decisión	27
4.1. Definición	27
4.1.1. Etiquetado	28
4.1.2. Conjunto de entrenamiento	28

1. Predicción en el mercado de valores

Una de las formas más sencillas, y a la vez difíciles, de enriquecerse es la compra de bienes y posterior venta a un precio mayor. La ganancia se produce si se consigue que la diferencia entre el precio de compra y el precio de venta sea mayor que los costes producidos a razón de esa transacción. En el mundo de los negocios la compra y venta aparece en casi todos los sectores económicos. Por ejemplo:

- Distribución de mercancías. Hay empresas que se dedican a comprar mercancías en un punto y distribuirlas por otras zonas a un precio mayor. El coste de este ejercicio reside en el transporte. La empresa debe asegurar que los costes de transportes no superan a la diferencia de precio entre compra y venta.
- Especulación de terrenos o edificios. Un poco más cara que la anterior, la compra y posterior venta de edificios puede producir beneficios. Las empresas que se dedican a esto tienen en cuenta las posibles construcciones que se van a hacer por la zona que, posiblemente, elevarán el valor del inmueble y harán el negocio posible. Mantener terreno conlleva un pago de impuestos, que tendrá que ser cubierto con el beneficio de la venta. Pero, en este caso, los inmuebles se pueden alquilar para sacar un beneficio continuo.

Del mismo modo, el mercado de valores brinda una posibilidad para extraer beneficio con la compra y venta. Se compran acciones a un precio determinado y se intentan vender a otro más alto. Si se tiene información adicional que nos dé certeza sobre la subida del precio de la acción entonces el negocio es seguro. Si por el contrario, no se dispone de información, el valor de las acciones podría bajar provocando una pérdida de dinero.

Por tanto, disponer de información sobre el mercado, sitúa a empresas y particulares en posiciones ventajosas. Es por esto que, siguiendo distintas estrategias, muchos intentan extraer información sobre la situación del mercado.

A lo largo de este proyecto, vamos a intentar extraer nuestra propia información a partir del histórico de valores del mercado, es decir, vamos a utilizar el estado del mercado en un período pasado para predecir el estado futuro.

1.1. Precedentes en la predicción de bolsa.

El primer mercado de valores se sitúa en el siglo XVII. Según afirma Beattie (2017) en la revista digital Investopedia, la primera empresa en ofrecer acciones se situaría en Bélgica, promovida por la incipiente economía generada en las colonias de Asia.

A lo largo de tantos años de vida, los valores bursátiles se han intentado predecir de muchas formas. A medida que la sociedad avanza y se van creando nuevas herramientas, los modelos de predicción van evolucionando y se hacen más complejos.

En la actualidad podemos distinguir varias agrupaciones de análisis de bolsa:

- **Análisis chartista.** Debe su nombre a la palabra inglesa *chart*. Las estrategias de esta agrupación se valen de reglas gráficas aplicadas sobre índices o sobre el propio valor de la acción. Esas reglas gráficas advierten de series temporales, como las ondas de Elliot (Elliot, 1994), o de tendencias y rupturas (Gartley, 1935).

Lleva utilizándose mucho tiempo por su simplicidad y su fácil comprensión y evaluación. Su éxito se debe probablemente a este hecho, y es que con una sencilla herramienta gráfica se pueden deducir, a gran escala, algunos valores.

- **Análisis de índices o indicadores.** Los índices son estadísticos que representan una determinada característica del estado de la bolsa de uno o varios valores distintos. Una de las publicaciones con más renombre es la teoría de Dow¹, cuyo autor, Charles H. Dow, fue el fundador del Wall Street Journal. Diario en el que publicaba sus principios para invertir en bolsa.

Algunos indicadores representan la situación general de la bolsa de un país, por ejemplo el IBEX35 (35 empresa con más capital de España). Otros indicadores representan la situación de las empresas que se dedican a un sector particular, como el SX7E (bancos de los países europeos). También hay indicadores que aportan información estadística sobre solo un valor, por ejemplo la EMA (Media Móvil Exponencial).

En este proyecto vamos a centrarnos en el análisis de indicadores de un solo valor. En concreto, como se verá a lo largo del trabajo, vamos a proponer un modelo basado en árboles de decisión formados con un algoritmo genético.

¹Hamilton, W. P. (1922). *The Stock Market Barometer; a Study of Its Forecast Value Based on Charles H. Dow's Theory of the Price Movement*. Harper & Bros..

1.2. Tipos de información extraíble a partir de árboles

Podemos encontrar en la bibliografía varios modelos basados en árboles que, según la información que persiguen conseguir se pueden dividir en varios grupos. Notar que existen otras formas y herramientas de extracción información o predeción, pero por la naturaleza de nuestra propuesta nos centraremos en las estrategias basadas en árboles.

1.2.1. Información total

El más ambicioso de los objetivos propuestos es el de encontrar una forma de predecir el valor exacto de un valor bursátil en un instante de tiempo futuro. Encontramos entonces una función $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ donde Ω es un conjunto de indicadores del valor a predecir en un instante pasado o presente y la imagen, contenida en \mathbb{R} es el valor predicho para un instante en el futuro.

El instante predicho cambia según el autor y, normalmente, cuanto más alejado está del instante en el que se evalúa f del instante que se pretende predecir, mayor es el error.

La función f se puede representar como un árbol en el que en los nodos se sitúan operaciones (usualmente unarias o binarias) y las hojas contienen parámetros de la función f o valores constantes. La función se evalúa desde las hojas hasta el nodo raíz.

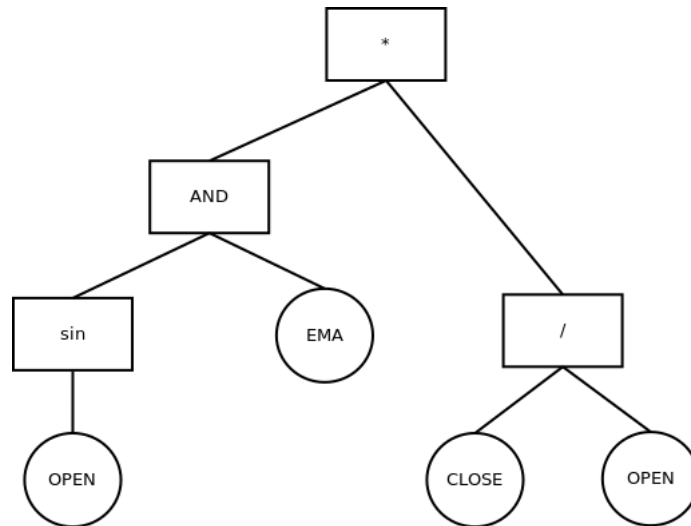


Figura 1: Árbol de programación genética.

En la figura 1 puede verse un árbol de este tipo. De este se puede extraer la función

$f(\text{OPEN}, \text{CLOSE}, \text{EMA}) = (\sin(\text{OPEN}) \text{ AND EMA}) * (\text{CLOSE}/\text{OPEN})$
que, dados unos valores para la apertura, el cierre y la media móvil exponencial, nos devuelve el valor en el instante futuro.

Para ajustar los árboles se usa un algoritmo genético con función *fitness* el error medio cuadrático entre el valor predicho y el error real (Sheta, 2013). También encontramos otra variante basada en el *Conditional Sharpe Ratio* en Esfahanipour (2011) y Mousavi (2014).

Por último, una función *fitness* algo diferente sería puntuar cada estrategia a partir del beneficio simulado obtenido en un periodo de tiempo (Potvin, 2004).

Si se consiguiese hallar una función f con un error nulo, obtendríamos una información perfecta con la que podríamos conseguir el máximo beneficio en bolsa. No obstante, este tipo de modelos es demasiado ambicioso. Computacionalmente es pesado y la función resultante no es, en casi todos los casos, interpretable.

1.2.2. Información de tendencias

En lugar de buscar una predicción exacta del valor en el futuro, podemos estar interesados en saber si el valor subirá o bajará.

Puede ser visto como una relajación del apartado anterior, aunque el paso de una imagen continua (\mathbb{R}) a una imagen discreta (sube, baja, se queda igual) nos obliga a realizar otro tipo de árboles. En este caso encontramos un árbol de decisión con tres etiquetas. No vamos a entrar en detalle aquí en esta herramienta, ya que será explicada mejor en el apartado 4.

Esta información es bastante más sencilla de interpretar. Pero, por contra, es bastante más imprecisa. EL modelo nos dice la tendencia que tendrá el valor, no obstante, según los objetivos de inversión, las comisiones u otras situaciones económicas esta información podría no ser suficiente para sacar beneficios.

Para profundizar en la extracción de este tipo de información se sugiere ver Nair (2010) o Huang (2008)

1.2.3. Información de señales de compra y venta

(Zhou, 2006)

2. Fundamentos de Bolsa

2.1. Mercado de valores

El mercado de valores o bolsa, es un tipo de mercado en el que se compran y venden productos bursátiles. Para este trabajo, prestaremos principal atención a las acciones, el producto bursátil más simple de un mercado de valores.

Una acción corresponde con una pequeña participación en la empresa a la que pertenezca la acción. De esta forma, inversores privados tiene la posibilidad de comprar porciones de empresas. Por ejemplo, si una empresa está dividida en 200 acciones, tras comprar 50 de estas, seríamos propietarios de una cuarta parte de la empresa. Esto puede reportarnos beneficios de distinta índole según las normas de la empresa. En ocasiones algunas empresas deciden repartir una determinada cantidad de dinero entre sus accionistas en relación a las ganancias obtenidas en un periodo (dividendo). Otras veces, ser poseedor de una gran parte de la empresa nos otorgará derechos dentro de la misma, como por ejemplo participar en las decisiones importantes que se tomen.

El mercado de valores español abre de 9:00 a 17:30 de lunes a viernes. Cabe destacar que hay una aleatoriedad de 30 segundos y que, además, después del cierre hay un periodo de subasta de 5 minutos para evitar manipulaciones de los precios. No vamos a entrar en como funciona este sistema.

2.2. El valor de las acciones

El valor de una acción no es fijo, va cambiando según la oferta y la demanda de las acciones de la empresa. Esto convierte a las acciones en un producto muy conveniente para especular.

El mecanismo de compra y venta es el que define el valor de una acción. Para comprar o vender, un inversor debe enviar a bolsa una orden de compra o venta, respectivamente. Tras enviar la orden, esta queda registrada y será ejecutada tan pronto como sea posible. Aclaremos esto con un ejemplo sencillo:

Supongamos que existe una empresa que tiene en el mercado cuatro acciones. Cada una de ellas pertenece a un propietario distinto, llamémosles A, B, C y D.

A tiene una orden de venta de su acción a 4 euros y C tiene una orden de compra de una acción a 1 euro. En esta situación ninguno puede vender ni comprar y el precio está situado en 4 euros por acción. Ahora bien, B decide

vender su acción por 3 euros. En el momento en el que realiza una orden de venta, el precio de las acciones baja a 3 euros. Esto no quiere decir que A venda su acción a este precio, para bajar de 4 a 3 euros el precio de su acción debería cancelar la orden y realizar una nueva. En esta situación no se puede ejecutar ninguna orden en el mercado, como se puede ver en la figura 2.

Órdenes de compra	Precio (euros)	Órdenes de venta
	5	
	4	1
	3	1
	2	
1	1	

Figura 2: Situación de las ordenes

Tras ver que el precio de la acción se bajado de 4 a 3 euros, el inversor D decide comprar y sitúa una orden de compra a 3 euros de una acciones. Entonces, la orden de venta de C y la orden de compra de D pueden ejecutarse. Ahora D pasa a tener 2 acciones y el mercado se queda con las dos órdenes de A y B, provocando que el precio de la acción vuelva a subir a 4 euros.

En el ejemplo anterior se han simplificado las órdenes de compra y venta. En realidad, las ordenes que existen son un poco más complejas:

- **Orden de mercado.** Se compran todas las acciones que se emitan en la orden al mejor precio posible. En caso de compra a los precios más bajos, en caso de venta a los precios más altos. Si B hubiera emitido una orden de mercado de una acción, habría comprado la acción de A a 4 euros.
- **Orden limitada.** Se compran todas las acciones que se emitan en la orden siempre y cuando su precio esté situado en el límite establecido. Si D hubiera emitido una orden limitada a 3 euros de dos acciones, hubiera comprado por 3 euros la acción de C pero no la de A, que está a 4 euros. La orden permanece vigente hasta que la suma de las acciones sea comprada.
- **Orden on Stop.** No se hace efectiva hasta que el precio de las acciones llega al precio de la orden. En ese momento, la orden se convierte en

una orden de mercado.

- **Orden Stop-Limit.** Este tipo de orden no se hace efectiva hasta que el precio de las acciones llega al precio de la orden. En ese momento, la orden se convierte en una orden limitada. Es muy frecuente que las plataformas ofrezcan este tipo de orden, pues funciona como seguro para no perder todo el capital cuando las acciones caen de precio rápidamente y el inversor posee acciones de la empresa.

2.3. Corredores de bolsa o brokers

Para agilizar las transacciones en bolsa, no se permite que particulares envíen órdenes al mercado. Esta tarea se delega en los corredores de bolsa o *brokers*. La entidad de *broker* se encarga de captar inversores, colocar órdenes y presentar a compradores con vendedores. Para ser broker se debe aprobar un examen y demostrar que se tienen los conocimientos necesarios. Por este trabajo se lleva una comisión que todo inversor debe abonar.

Las comisiones pueden ser de dos tipos:

- **Comisiones fijas.** Son un valor fijo que cada broker cobra. Pueden ser por transacción, según cantidad de acciones y su precio, y por tiempo de servicio, la cantidad de días que el cliente dispone para realizar transacciones. Las comisiones fijas son beneficiosas para inversores con un gran capital.
- **Comisiones variables.** Son precios variables que dependen del país de inversión, la cantidad invertida e incluso el tiempo. Las comisiones variables afectan en misma medida a inversores grandes y pequeños. Por este motivo, un inversor con poco capital pagará menos comisiones con este tipo de cobro.

La mayoría de los corredores de bolsa tienen comisiones mixtas. Algunos cobran distintas comisiones según la bolsa en la que se quiera operar.

No corresponde a este trabajo discutir más allá sobre este tema. De ahora en adelante asumiremos unas comisiones variables.

2.4. Herramientas de simulación

2.4.1. MetaTrader5

MetaTrader5 es una software, disponible en versión escritorio y en versión web, con el que se pueden comprar y vender acciones de forma simulada, es

decir, sin participar con dinero real. Podemos observar que es una plataforma ampliamente usada, por tanto, es fácil encontrar ejemplos iniciales o ayuda técnica. En la página web de la plataforma² se nos ofrece una demo gratuita con acceso a casi todos los recursos.

La programación de las estrategias se divide en varios archivos con unas especificaciones concretas. No obstante, existe una tienda empotrada en la plataforma para comprar y vender estrategias, índices o bibliotecas con otros usuarios. Cada producto está puntuado por los usuarios que la han usado.

A pesar de todas estas ventajas, no usaremos MetaTrader5 por ser de carácter privativo. Además, el lenguaje de programación de las estrategias es MQL5, un lenguaje propio de la plataforma que nos impide usar con facilidad bibliotecas externas.

2.4.2. Backtrader

Backtrader es un framework de libre licencia realizado en el lenguaje Python. La página web de la plataforma³ contiene una amplia documentación en la que se explican todos los componentes del framework. Asimismo encontramos el método de instalación y un tutorial de iniciación.

El framework viene con indicadores ya programados, aunque te permite hacer más de forma manual. También se pueden producir gráficos temporales, pero hay que instalar una librería adicional. Esto no es problema porque viene integrada en la instalación como veremos a continuación.

2.4.2.1 Instalación

Pasamos ahora a su instalación. Necesitamos tener la versión 2.7 de Python, tal y como se indica en la documentación de backtrader⁴ que podemos encontrar en su página web. Para comprobar la versión podemos usar el comando *python -Version*. En caso de no tener instalado Python o no tener la versión indicada, podemos instalarlo usando *sudo apt-get install python2.7*.

El framework backtrader está disponible desde el código fuente en Github. No obstante, es más cómodo usar la versión para el instalador de paquetes de Python pip. Si no está instalado pip, podemos hacerlo con el comando

²<https://www.metatrader5.com> [Última consulta 10 de Julio de 2019]

³<https://www.backtrader.com> [Última consulta 10 de Julio de 2019]

⁴<https://www.backtrader.com/docu/index.html> [Última consulta 10 de Julio de 2019]

`sudo apt-get install python-pip.`

Una vez llegados a este punto, podemos optar por una versión con posibilidad de generar gráficas o no. Para facilitar el análisis de resultados, instalaremos la versión con plotting con el comando `pip install backtrader[plotting]` como podemos ver en la figura 3. El mismo comando quitando la directiva `[plotting]` instala la versión sin posibilidad de hacer gráficas.

```
miguel@miguelpc:~$ pip install backtrader[plotting]
Collecting backtrader[plotting]
  Downloading https://files.pythonhosted.org/packages/.../backtrader-2.4.0-py3-none-any.whl (419kB)
  100% |#####| 419kB 2.4MB/s
Collecting matplotlib; extra == "plotting" (from backtrader[plotting])
  Downloading https://files.pythonhosted.org/packages/.../matplotlib-3.1.0-py3-none-any.whl (12.6MB)
  100% |#####| 12.6MB 14MB/s
Collecting pyparsing!=2.0.4,!=2.1.2,!=2.1.6,>=2.0.1 (from matplotlib; extra == "plotting")
  Downloading https://files.pythonhosted.org/packages/.../pyparsing-2.4.7-py2.py3-none-any.whl (61kB)
  100% |#####| 61kB 6.6MB/s
Collecting backports.functools-lru-cache (from matplotlib; extra == "plotting")
  Downloading https://files.pythonhosted.org/packages/.../backports.functools-lru-cache-1.6.2-py2.py3-none-any.whl (102kB)
  100% |#####| 102kB 8.1MB/s
Collecting pytz (from matplotlib; extra == "plotting")
  Downloading https://files.pythonhosted.org/packages/.../pytz-2019.1-py2.py3-none-any.whl (512kB)
  100% |#####| 512kB 2.9MB/s
Collecting six>=1.10 (from matplotlib; extra == "plotting")
  Downloading https://files.pythonhosted.org/packages/.../six-1.12.0-py2.py3-none-any.whl (215kB)
  100% |#####| 215kB 4.4MB/s
Collecting python-dateutil>=2.1 (from matplotlib; extra == "plotting")
  Downloading https://files.pythonhosted.org/packages/.../python-dateutil-2.6.1-py2.py3-none-any.whl (255kB)
  100% |#####| 255kB 4.4MB/s
Collecting kiwisolver>=1.0.1 (from matplotlib; extra == "plotting")
  Downloading https://files.pythonhosted.org/packages/.../kiwisolver-1.1.0-py2.py3-none-any.whl (952kB)
  100% |#####| 952kB 1.7MB/s
Collecting cycler>=0.10 (from matplotlib; extra == "plotting")
  Downloading https://files.pythonhosted.org/packages/.../cycler-0.10.0-py2.py3-none-any.whl (12.1kB)
  100% |#####| 12.1kB 1.0MB/s
Collecting numpy>=1.7.1 (from matplotlib; extra == "plotting")
  Downloading https://files.pythonhosted.org/packages/.../numpy-1.16.2-py2.py3-none-any.whl (12.1MB)
  100% |#####| 12.1MB 1.0MB/s
Collecting setuptools (from kiwisolver>=1.0.1->matplotlib)
  Downloading https://files.pythonhosted.org/packages/.../setuptools-40.8.0-py2.py3-none-any.whl (573kB)
  100% |#####| 573kB 2.6MB/s
```

Figura 3: Resultado de instalar backtrader con plotting

Observamos que se han instalado otros paquetes adicionales. En concreto se ha instalado el paquete numpy, que más tarde nos será útil como herramienta matemática.

2.4.2.2 Preparación del entorno

Una de las estructuras de datos más comunes en backtrader son las líneas. Una línea no es más que un conjunto de pares ordenados por uno de los elementos de menor a mayor. Por ejemplo, al hablar de un valor de mercado tenemos 5 líneas: valor de apertura, valor de salida, valor máximo, valor mínimo y volumen de compra/venta.

Al acceder a cada línea hay que tener en cuenta que no usa la indexación de un vector en un lenguaje común. En su lugar, el índice 0 representa el ins-

tante actual y para acceder a instantes anteriores usaremos índices negativos, por ejemplo:

```
self.sma = SimpleMovingAverage(...)
valor_actual = self.sma[0]
valor_instante_anterior = self.sma[-1]
```

Antes de ver como crear una estrategia, vamos a ver como podemos simular una prueba introduciendo unos datos y un presupuesto inicial. Para ello, en un archivo con formato py para que podamos ejecutar con Python escribimos el siguiente código:

```
from __future__ import (absolute_import, division, print_function, unicode_literals)

import datetime
import os.path
import sys
import backtrader as bt # Importar todas las herramientas de backtrader

if __name__ == '__main__':
    cerebro = bt.Cerebro()

    # Crear un paquete de datos
    data = bt.feeds.YahooFinanceCSVData(
        dataname='YAHOO', # Ruta absoluta donde se encuentran los datos descargados de YAHOO! Finance
    # Fecha inicial de los datos
        fromdate=datetime.datetime(2000, 1, 1),
    # Fecha final de los datos
        todate=datetime.datetime(2000, 12, 31),
        reverse=False)

    # Activar los datos en el cerebro
    cerebro.adddata(data)
    # Establecer dinero inicial
    cerebro.broker.setcash(100000.0)

    print('Starting Portfolio Value: %.2f' % cerebro.broker.getvalue())
    cerebro.run() # EJECUTAR BACKTESTING (AHORA MISMO, SIN NINGUNA ESTRATEGIA)
    print('Final Portfolio Value: %.2f' % cerebro.broker.getvalue())
```

Notemos que se trata de una archivo Python en el que solo hemos tenido que importar el paquete *backtrader*. Por tanto, en el caso de necesitar otros paquetes para realizar nuestra estrategia, solo tenemos que incorporarlos de forma habitual.

En este ejemplo, no le hemos especificado a la clase *cerebro* cuál va a ser la estrategia a seguir. Por este motivo, al hacer la simulación el presupuesto inicial y final no varían. Para ejecutar el backtesting simplemente se ejecuta el script de Python con el comando *python rutadelscript.py* en terminal. Nos dará un fallo, la ruta donde debería estar el fichero con los datos está vacía, pues no hemos descargado ningún archivo de datos. Este tema se abordará en la sección 2.5.

2.4.2.3 La primera estrategia

Antes de programar la primera estrategia de *trading*, vamos a ilustrar con una estrategia fútil cómo estructurar una clase para que backtrader pueda

trabajar con ella como tal. La estructura básica es una clase con un método `__init__` y otro método llamado `next`.

El primero puede usarse para instanciar y agrupar los datos que requiere nuestra estrategia. El segundo método es llamado en cada instante por backtrader. Consideramos que un instante es cada una de las marcas temporales que hay registradas en nuestros datos. Así pues, los datos recogidos en `__init__` son la referencia para llamar al método `next`. Cabe destacar que en cada llamada al segundo método solo son accesibles los datos con marcas temporales menores o iguales al instante correspondiente a la llamada.

Veamos un ejemplo:

```
# Crear una estrategia
class TestStrategy(bt.Strategy):

    def log(self, txt, dt=None):
        dt = dt or self.datas[0].datetime.date(0)
        print('%s, %s' % (dt.isoformat(), txt))

    def __init__(self):
        # Guarda una referencia de la línea de valores de cierre
        self.dataclose = self.datas[0].close

    def next(self):
        # Muestra por pantalla el valor de cierre
        self.log('Close, %.2f' % self.dataclose[0])
```

Al ejecutar esta estrategia, veremos el valor de cierre de cada instante y, si los datos lo facilitan, la marca temporal asociada a cada instante.

Para activar la estrategia es necesario indicar al *cerebro* la clase creada con la siguiente línea, que puede ser situada justo después de indicar el presupuesto inicial.

```
# Registrar estrategia
cerebro.addstrategy(TestStrategy)
```

La estrategia está completa, pero no realizamos ninguna compra ni venta. Para nuestro posterior estudio es imprescindible introducir estas acciones, sin embargo, por motivos de espacio y tiempo, no entraremos en profundidad en todos los aspectos de la compraventa. Veamos el código de una nueva táctica de inversión que nos muestra el funcionamiento de las órdenes bursátiles:

```
class DoubleDownStrategy(bt.Strategy):

    def log(self, txt, dt=None):
        dt = dt or self.datas[0].datetime.date(0)
        print('%s, %s' % (dt.isoformat(), txt))

    def __init__(self):
        self.dataclose = self.datas[0].close

        # Para mantener las órdenes no ejecutadas
        self.order = None

    def notify_order(self, order):
        if order.status in [order.Submitted, order.Accepted]:
            return

        if order.status in [order.Completed]:
            if order.isbuy():
                self.log('BUY EXECUTED, %.2f' % order.executed.price)
            elif order.issell():
                self.log('SELL EXECUTED, %.2f' % order.executed.price)
```

```

        self.bar_executed = len(self)

    elif order.status in [order.Canceled, order.Margin, order.Rejected]:
        self.log('Order Canceled/Margin/Rejected')

    self.order = None

    def next(self):
        self.log('Close, %.2f' % self.dataclose[0])
        # Si hay una compraventa pendiente no puedo hacer otra
        if self.order:
            return

        # Si no tengo nada adquirido
        if not self.position:
            if self.dataclose[0] < self.dataclose[-1]:
                if self.dataclose[-1] < self.dataclose[-2]:
                    self.log('BUY CREATE, %.2f' % self.dataclose[0])
                    self.order = self.buy()
            else:
                # Ya hemos adquirido algo
                if len(self) >= (self.bar_executed + 5):
                    self.log('SELL CREATE, %.2f' % self.dataclose[0])
                    self.order = self.sell()

```

Aquí introducimos varios nuevos conceptos del framework. En primer lugar, las acciones *self.buy()* y *self.sell()* ejecutadas dentro del método *next* indican que queremos lanzar una orden de compra o de venta, respectivamente. Cuando no se especifica, backtrader compra o vende al precio de cierre del instante actual una acción. Esto no quiere decir que la orden se ejecute en ese instante, si no que, a partir de ese momento y si el precio del producto lo permite, se realizará. Notar que una vez lanzada una orden hay que esperar a que se complete o se cancele antes de lanzar otra.

Esta situación hace necesario incluir el método *notify_order*. Como su propio nombre sugiere, es llamado cuando una orden cambia de estado. En este ejemplo, cuando una orden es completada, mostramos por pantalla si es era de compra o venta y el precio de la misma. Las ordenes pueden ser canceladas o rechazadas. Un ejemplo de este hecho sería intentar comprar una cantidad de acciones con un presupuesto insuficiente para las mismas.

Por último, comentaremos la parte lógica de la estrategia. En cada instante, el método *next* evalúa alguno de los siguientes casos:

- **Existe una compraventa lanzada y no terminada.** En este caso debemos esperar. Notar que backtrader permite cancelar una orden, aunque no entraremos en este punto.
- **No hay una orden lanzada y tampoco tengo nada comprado.** Esto puede comprobarse con *self.position*, que devuelve negativo si no se tiene nada en posesión. En esta situación solo cabe esperar una orden de compra y para este ejemplo la lanzaremos si los últimos dos instantes han bajado su precio de cierre.

- **No hay una orden lanzada pero tengo algo comprado.** Para ilustrar una nueva herramienta, vamos a lanzar una orden de venta 5 instantes después de haber comprado. Para ello podemos comprobar la longitud de *self* con la función *len* de Python.

2.4.3. Otras plataformas

- **Tradestation** permite programar estrategias, pero no hacer *backtesting*. Además no es de acceso gratuito.
- **Cloud9trader** tiene una demo que permite programar estrategias y hacer *backtesting*. Está bien para probar estrategias sencillas basadas en indicadores ampliamente conocidos. No obstante, la programación hay que hacerla en la ventana del navegador, con un lenguaje propio y sin posibilidad de usar paquetes externos.
- **Plus500** es una plataforma de trading con escasas posibilidades de automatización. Tan solo permite algunas órdenes sencillas condicionales preprogramadas.
- **PyAlgoTrade** es un proyecto desarrollado en Python disponible en Github. Tiene posibilidad de *backtesting*, utilizar paquetes externos y, en el caso de estar haciendo *trading* con Bitcoins, comprar y vender estos de forma real. Los datos del mercado hay que conseguirlos de forma externa en formato CSV.

2.5. Conseguir datos históricos para realizar backtesting

Como vamos a usar backtrader, una herramienta de simulación de bolsa en local, vamos a necesitar extraer el histórico de la bolsa. En esta sección veremos como conseguir los valores históricos en bolsa de diferentes empresas de forma automática. A parte de conseguir los datos, vamos a ver como se incorporan a backtrader para su posterior uso.

2.5.1. Quandl

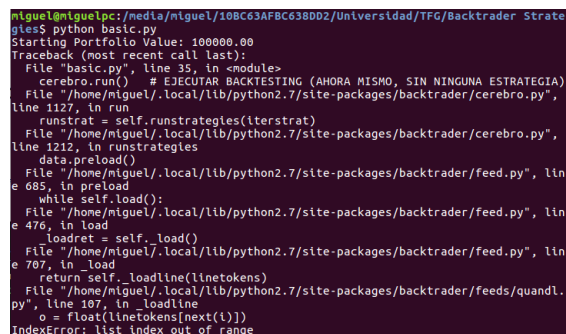
Quandl es una empresa que reúne miles de paquetes de datos financieros de todo el mundo. Para acceder a esta información es necesario registrarse en su página web. Una vez tengamos acceso, es posible descargar muchos de los archivos en formato csv. Aunque quizás la opción más cómoda para este proyecto es utilizar la api que ofrece. De esta forma podemos realizar el

acceso a los datos desde Python, sin necesidad de hacer una descarga previa a la ejecución del script.

Para usar la api seguiremos los pasos de instalación que se pueden encontrar en la documentación⁵ de Quandl. Instalamos el paquete quandl con el gestor de paquetes pip. Para usar el paquete quandl, debemos indicar a Quandl la *api_key* que nos dan al inscribirnos en su página.

```
# Crear un paquete de datos con QUANDL
data = bt.feeds.Quandl(
    dataset='WFE',
    fromdate = datetime.datetime(2016,1,1),
    todate = datetime.datetime(2017,1,1),
    dataname='INDEXES.BMESPANISHEXCHANGESMADRID',
    buffered=True,
    apikey='')
```

No obstante, como puede verse en la figura 4 backtrader tiene algún error interno al usar esta api. Probablemente, como en este foro de la comunidad se apunta⁶, se debe a una mala lectura de los vectores de datos recibidos.



```
miguel@miguelpc:/media/miguel/10BC63AFBC638DD2/Universidad/TFG/Backtrader Strategies$ python basic.py
Starting Portfolio Value: 100000.00
Traceback (most recent call last):
  File "basic.py", line 35, in <module>
    cerebro.run() # EJECUTAR BACKTESTING (AHORA MISMO, SIN NINGUNA ESTRATEGIA)
  File "/home/miguel/.local/lib/python2.7/site-packages/backtrader/cerebro.py",
line 1127, in run
    runstrat = self.runstrategies(literstrat)
  File "/home/miguel/.local/lib/python2.7/site-packages/backtrader/cerebro.py",
line 1212, in runstrategies
    data.preload()
  File "/home/miguel/.local/lib/python2.7/site-packages/backtrader/feed.py", lin
e 685, in preload
    while self.load():
  File "/home/miguel/.local/lib/python2.7/site-packages/backtrader/feed.py", lin
e 476, in load
    loadret = self._load()
  File "/home/miguel/.local/lib/python2.7/site-packages/backtrader/feed.py", lin
e 707, in _load
    return self._loadline(linetokens)
  File "/home/miguel/.local/lib/python2.7/site-packages/backtrader/feeds/quandl.
py", line 197, in _loadline
    o = float(linetokens[next(t)])
IndexError: list index out of range
```

Figura 4: Ejecución del script recolectando datos de Quandl.

2.5.2. YAHOO! Finance

Una de las opciones más completas para conseguir los datos es la página web de YAHOO! Finance (<https://finance.yahoo.com>). Basta con buscar el índice o la empresa sobre la que se quieren los datos, indicar las fechas y la frecuencia de muestreo y pinchar en el botón de descarga. Los datos se descargan en formato CSV. Este formato es ampliamente utilizado por la comunidad científica para almacenar grandes cantidades de datos.

⁵<https://docs.quandl.com/docs/python-installation> [Última consulta 10 de Julio de 2019]

⁶<https://community.backtrader.com/topic/797/quandl-data-feed-futures-data> [Última consulta 10 de Julio de 2019]

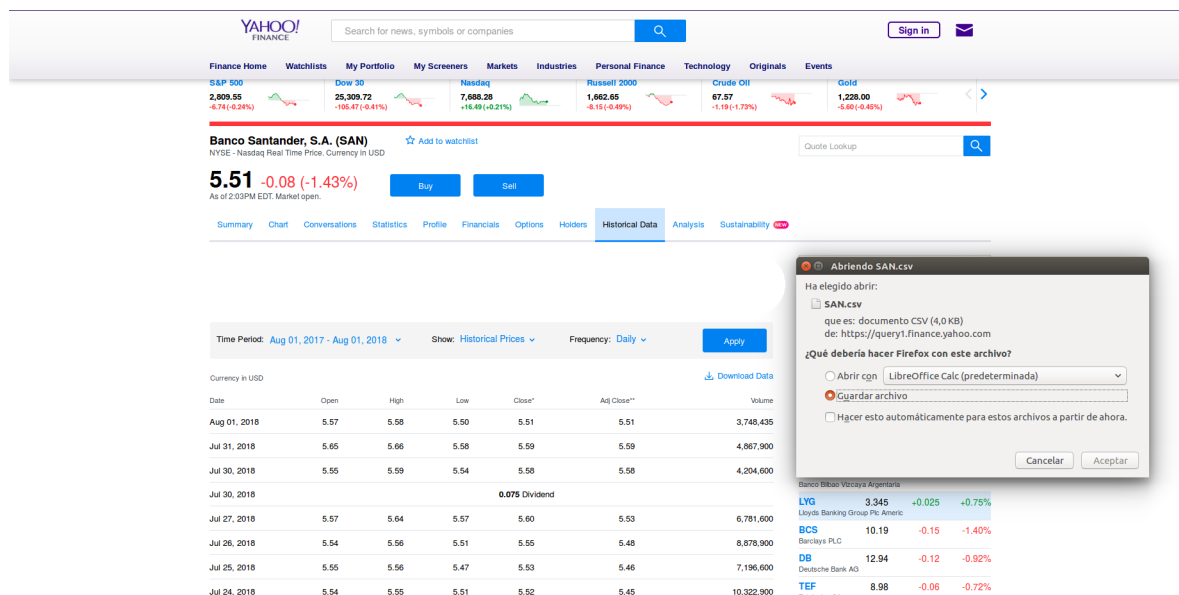


Figura 5: Descarga de los datos históricos de Banco Santander.

Por ejemplo, imaginemos que buscamos los valores históricos de Banco Santander desde el 1 de agosto de 2017 hasta la misma fecha del año siguiente. Para ello indicamos la empresa, nos vamos al apartado de *Historical Data* e indicamos las fechas. El resultado se muestra en la figura 5.

Para cargar estos datos en backtrader basta con indicar la ruta y el rango de fechas con el siguiente código:

```
# Crear un paquete de datos con YAHOO FINANCE
data = bt.feeds.YahooFinanceCSVData(
    dataname='Data/SAN.csv',
    fromdate=datetime.datetime(2017, 8, 1),
    todate=datetime.datetime(2018, 8, 1),
    reverse=False)

# Activar los datos en el cerebro
cerebro.adddata(data)
```

3. Algoritmos genéticos

La evolución es un proceso de optimización cuyo objetivo es la mejora continua de una habilidad o característica. Este proceso se observa en la mayoría de los seres vivos que, en un intento de adaptarse al medio y fortalecerse, cambian progresivamente.

Los algoritmos genéticos tienen como inspiración este comportamiento. Para hallar la solución óptima de un problema, se genera una población de soluciones, no necesariamente buenas. Se simula una descendencia de estas, es decir, nuevas soluciones del problema que se parecen a las anteriores y, mediante selección natural, se favorece la evolución de la solución hacia una mejora.

A continuación se ofrece una aproximación a los algoritmos genéticos. Un desarrollo más profundo puede encontrarse en otras obras⁷.

3.1. Definición

Un algoritmo genético se compone de cinco elementos básicos:

- **Población.** Un conjunto de soluciones del problema que queremos resolver. Su representación computacional definirá al resto de los elementos.
- **Función fitness o función de evaluación.** Una función cuyo dominio sea la población del problema y que tenga por imagen algún subconjunto de \mathbb{R} . Representa como de buena es una solución.
- **Cruce.** Un proceso mediante el cual una o varias soluciones produzcan una o varias soluciones combinadas nuevas.
- **Mutación** Un proceso que actúe sobre un individuo de la población y le produce una transformación significativa. Este procedimiento no es imprescindible, pero ayuda a que las soluciones sigan variando tras muchas generaciones.
- **Selección.** Un criterio de eliminación que permite descartar individuos de la población.

⁷Engelbrecht, A. P. (2007). *Computational intelligence: an introduction*. John Wiley & Sons.

3.1.1. Población

En la naturaleza, cada organismo tiene unas características concretas que influyen en su habilidad para sobrevivir y reproducirse. Estas características, en última instancia, se pueden representar por los cromosomas de dicho individuo. En un algoritmo genético se usa tradicionalmente la notación de cromosoma para referirse a la codificación de un individuo.

La representación clásica de un cromosoma es un vector de bits de dimensión fija.

En el caso de que el espacio de búsqueda sea discreto, cada individuo de la población se puede representar con un vector de longitud n donde 2^n es el número de valores posibles del espacio.

En el caso continuo, tomaremos \mathbb{R}^n como espacio de búsqueda y será necesario acotarlo, es decir, el dominio es de la forma

$$[x_{min_1}, x_{max_1}] \times \dots \times [x_{min_i}, x_{max_i}] \times \dots \times [x_{min_n}, x_{max_n}]$$

Mediante una representación binaria, por ejemplo la de coma flotante, de profundidad l podemos transformar cada $x = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \in \mathbb{R}$ en $b = (b_1, \dots, b_i, \dots, b_n)$ donde $\forall 0 < i \leq n \ b_i \in \{0, 1\}^l$. Esto nos permite trabajar con el caso continuo igual que con el caso discreto.

Por supuesto, esto es solo una propuesta clásica que se aplica a un caso genérico. Según el problema a tratar un individuo puede representarse de otras formas más convenientes.

Una vez que tenemos representado a un individuo, la población será un conjunto de estos. La cantidad de individuos de la población se puede variar a lo largo de la ejecución del algoritmo aunque, cuanto mayor sea el número de individuos, mayor será el espacio de búsqueda inspeccionado y mejores serán los resultados. Eso si, pagaremos esta mejor búsqueda con un incremento del tiempo de ejecución. Así mismo, la calidad de la población en la primera generación determinará, en gran medida, la calidad de las generaciones posteriores.

3.1.2. Función fitness

En un modelo evolutivo, el individuo con mejores características tiene mayores posibilidades de sobrevivir. Con motivo de valorar como de bueno es un individuo de la población necesitamos una función matemática que

nos cuantifique la bondad de este. Definimos la función *fitness* o función de evaluación como

$$f : \Gamma \rightarrow \mathbb{R}$$

donde Γ es el espacio donde se definen los individuos de la población.

Esta función debe evaluar cada individuo de cada generación luego, al tratarse de un algoritmo iterativo, conviene que la función no sea computacionalmente pesada. A menudo se usan aproximaciones de la función de evaluación real.

3.1.3. Selección

La selección es el operador básico de la evolución. Su objetivo es dar importancia a los individuos fuertes y aumentar su presencia. Se pueden aplicar operadores de selección en dos momentos a lo largo del algoritmo:

- En la selección de la nueva generación, para filtrar los individuos más fuertes (hablando en términos de la función *fitness*).
- En el cruce de los individuos para producir una nueva generación. Es razonable que los individuos con mejores características tengan más posibilidades de tener descendientes en la próxima generación.

Existen multitud de formas de aplicar la selección, las más comunes son las siguientes.

Selección aleatoria

Cada individuo de la población tiene la misma probabilidad de salir elegido, $\frac{1}{s}$ donde s es el número de individuos.

Selección proporcional

La probabilidad de que un individuo sea seleccionado viene dado por la función $\varphi : \Gamma \rightarrow [0, 1]$ definida como

$$\varphi(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{j=1}^s f(x_j)}$$

Selección por torneo

Se extrae una muestra (con o sin devolución) de la población de tamaño k con $k < s$. Se selecciona entonces el individuo con mayor puntuación en la

función *fitness*.

Selección basada en posición

En lugar de usar directamente la puntuación de la función *fitness*, se usa la posición respecto al resto de individuos de la población.

Se selecciona el elemento x_i donde $i = \text{Entera}(Z)$ y $Z \sim U(0, U(0, s))$ siendo U la distribución uniforme.

Selección con elitismo

En ciertos casos conviene mantener a los mejores individuos de una población. Esto asegurará que la nueva población tendrá algún individuo al menos tan bueno como en la generación anterior.

Seleccionar varios individuos para que permanezcan en la población suele ser una buena práctica.

3.1.4. Cruce

La reproducción es el proceso mediante el cual los individuos de una población generan la siguiente población. Un cruce es una operación que, dados uno o varios individuos padres, genera uno o varios individuos hijos que pasarán a la próxima generación.

La forma técnica de hacer un cruce depende directamente de la representación de los individuos. Vamos a presentar algunas formas de hacer cruces cuando tenemos representación binaria pura.

Cruce de un punto

Dados dos padres a cruzar, se toma un valor i donde $i = \text{Entera}(Z)$ y $Z \sim U(1, l - 1)$ con l la longitud del vector de bits que representa a un individuo.

Se generan entonces dos individuos. El primero tendrá los i primeros bits del primer padre y los $l - i$ últimos del segundo progenitor. El segundo individuo se genera con los bits que no se han tomado en el primero.

Cruce de dos puntos

Similar al cruce de un punto. La diferencia con este es que la parte que se toma del primer padre para el primer hijo viene dada por una subcadena de los bits del padre de inicio y final dos índices generados con una distribución uniforme, como venimos haciendo.

Notar que aleatorizar el final de la subcadena es equivalente a aleatorizar la dimensión de la misma. En ocasiones se puede optar por una subcadena

de tamaño fijo.

Cruce uniforme

Es un procedimiento similar a los anteriores, solo que bit a bit. Se inicializa una máscara de tamaño l a 0. Por cada elemento de la máscara, se toma un valor de $X \sim U(0, 1)$, si $x > p$ entonces el valor de la máscara se actualiza a 1. El primer hijo tendrá los bits del primer padre que tengan 0 en la máscara y el resto del segundo padre. El segundo hijo se construye de forma contraria.

3.1.5. Mutación

El objetivo de las mutaciones es la introducción de nuevo material genético en la población, más allá de las combinaciones entre los individuos. Una mutación demasiado común o demasiado agresiva producirá que se pierda el factor evolutivo, no obstante, en determinadas dosis puede llegar a ser efectivo para explorar más en el espacio de búsqueda.

Al igual que en la sección de cruce, tenemos distintas variantes de esta operación basadas en la forma de escoger los bits a mutar.

Mutación uniforme

Dado un individuo, se seleccionan, a partir de una distribución uniforme, los bits a mutar. La mutación consiste en poner el valor contrario al original (0 si era 1 y 1 si era 0).

Mutación *inorder*

Similar a la anterior, pero los bits mutables son solo un subconjunto de los totales. Dicho subconjunto inmutable puede ser producto de una aleatorización o seleccionado manualmente si se quiere proteger una zona de este operador.

Mutación Gaussiana

Esta es una mutación basada en el método de ruido Gaussiano. Si se ha usado la codificación binaria de los individuos, es necesario volver al valor decimal que este representa.

Ahora se usa el método de ruido Gaussiano sobre el valor decimal, esto es, $x_j = x_j + N(0, \sigma_j)$ con N la distribución normal y $\sigma_j = x_j * 0,1$

Para concluir se devuelve la variable a la codificación binaria.

Con este último método se pueden proteger los cambios drásticos en los valores, ya que la distribución normal controla que no se cambien los bits

más significativos en la codificación binaria.

3.2. Ejemplo de algoritmo genético con Pyvolution

Pyvolution es un paquete de Python que facilita el uso de algoritmos genéticos. Aunque la última versión fue lanzada en 2012, es un paquete completo, con una sintaxis simple y sencillo de utilizar. En apenas 30 líneas y sin necesidad de dar muchas especificaciones se pueden realizar algoritmos completos. Una ejecución normal consta de varios parámetros donde se pueden controlar las características de las generaciones, los individuos por generación, probabilidad y severidad de las mutaciones, cantidad de individuos elitistas e, incluso, el tiempo máximo de ejecución.

Para ilustrar brevemente su uso, muestro uno de los ejemplos que vienen en la página de Github del paquete⁸.

```
import math
from pyvolution.EvolutionManager import *
from pyvolution.GeneLibrary import *

"""
Queremos calcular una solucion del siguiente sistema:
a + b + c - 17 = 0
a^2 + b^2 - 5 = 0
"""

def fitnessFunction(chromosome):
    """
    Dado un "cromosoma", esta es la funcion que calcula su puntuacion
    La puntuacion es una float mayor que 0.
    """

    #Accedemos a los cromosomas o valores a ajustar
    a = chromosome["a"]
    b = chromosome["b"]
    c = chromosome["c"]
    d = chromosome["d"]

    #Calculamos los valores que nos gustaria que fueran 0
    val1 = math.fabs(a + b + c - 17)
    val2 = math.fabs(math.pow(a, 2) + math.pow(b, 2) - 5)

    #La funcion distancia agrupa los valores para una mejor puntuacion
    dist = math.sqrt(math.pow(val1, 2) + math.pow(val2, 2))

    if dist != 0:
        return 1 / dist # Cuanto menor sea la distancia mayor sera la puntuacion
    else:
        return None      #Devolver None indica que los cromosomas han sido ajustados

#Configuramos el algoritmo genetico
em = EvolutionManager(
    fitnessFunction,
    individualsPerGeneration=100,
    mutationRate=0.2,          #Probabilidad de mutacion
    maxGenerations=1000,
    stopAfterTime=10,          #Para simulacion tras 10 segundos
    elitism=2,                  #Mantener los 2 mejores de cada generacion
)

#Creamos una funcion de mutacion inversamente proporcional a la bondad del ajuste
mutator = FloatInverseFit("mut", maxVal=0.01, startVal=1)
```

⁸<https://github.com/littlel/pyvolution> [Última consulta 10 de Julio de 2019]

```

#Indicamos que los puntos iniciales se toman siguiendo una distribucion normal
#de media 0 y desviacion 100. Ademas marcamos la mutacion como la definida antes.
atype = FloatGeneType("a", generatorAverage=0, generatorSTDEV=100, mutatorGene="mut")
btype = FloatGeneType("b", generatorAverage=0, generatorSTDEV=100, mutatorGene="mut")
ctype = FloatGeneType("c", generatorAverage=0, generatorSTDEV=100, mutatorGene="mut")

#Registramos los parametros y la mutacion
em.addGeneType(mutator)
em.addGeneType(atype)
em.addGeneType(btype)
em.addGeneType(ctype)

#Ejecutamos
result = em.run()

```

A pesar de la sencillez, no sería práctico usar este paquete de Python para nuestro propósito. En su lugar, realizaremos una estructura de algoritmo genético propio.

4. Árbol de Decisión

Los árboles se utilizan en diversos campos de la informática. A pesar de que son difíciles de representar y visualizar de forma global, resultan una herramienta muy útil para separar situaciones o datos.

La estructura de los árboles se puede usar con muchos fines: ordenar un vector, resolver problemas de alta complejidad computacional (como encontrar la mejor jugada posible en un tablero de ajedrez), representación de redes de routers y switches o expresar la gramática de un lenguaje entre otros.

En el caso que nos ocupa, estamos interesados en un tipo muy especial de árboles, los árboles de decisión.

4.1. Definición

Un grafo simple es un grafo sin lazos ni aristas múltiples entre sus vértices. Un árbol es un grafo simple G tal que para cada dos vértices de G existe un único camino simple entre ellos.

Un árbol de decisión será, por tanto, un árbol compuesto por:

- Un vértice especial, llamado nodo raíz, que se considera el inicio del camino de decisión.
- Un conjunto de vértices, llamados nodos, conectados con al menos otros 2 vértices. En cada nodo hay una condición. La verificación de dicha condición determina que nodo es el siguiente en el camino de decisión.
- Un conjunto de vértices, llamados hojas o nodos terminales, conectados con un único vértice. En cada hoja hay una clasificación del dato que cumple todas las condiciones que tienen los nodos del camino desde la raíz hasta la hoja.

El objetivo de un árbol de decisión es, por tanto, clasificar datos de una determinada naturaleza según una serie de condiciones. La construcción de dicho árbol y la elección de las condiciones las veremos en los siguientes apartados.

Planteamos un problema para dar un ejemplo de árbol de decisión. En un campeonato de tenis al aire libre son necesarias unas buenas condiciones meteorológicas. Para tomar la decisión de si se puede jugar un partido o no podemos plantear el árbol de decisión de la figura 6.

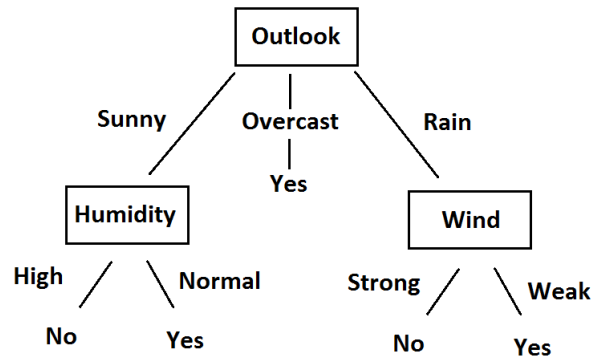


Figura 6: Árbol de decisión. Extraído de <https://sefiks.com> [Última consulta 12 de Julio de 2019]

El árbol se interpreta del nodo raíz hasta las hojas. Luego la primera condición a comprobar es el estado del cielo, si está nublado entonces se juega, si por el contrario está soleado o lloviendo entonces hay que comprobar otra condición para tomar la decisión.

4.1.1. Etiquetado

Para poder clasificar un dato, es necesario saber cuáles son las posibles clasificaciones o, como se suele nombrar, cuales son las clases de los datos. Esta clase viene dada por la etiqueta o *tag*. En el ejemplo anterior del campeonato de tenis las clases serían jugar y no jugar. Cuando el problema solo tiene dos clases se nombra problema binario.

En el caso que nos ocupa, el *trading* en bolsa, no se tiene una clasificación natural. Crear estas clases de manera que representen un buen momento para comprar o vender será objeto de estudio en nuestro trabajo.

4.1.2. Conjunto de entrenamiento

Una vez que la estructura del árbol esta hecha es sencillo clasificar un dato. Basta con ir comprobando las condiciones de cada nodo y continuar el recorrido del grafo según los resultados de estas. Cuando una condición nos dirija a una hoja, encontraremos la clase predicha para ese dato concreto. Pero, ¿cómo podemos crear el árbol?

Aquí entra el juego el conjunto de entrenamiento. Un conjunto de entrenamiento es un compendio de datos, de la misma naturaleza que los que queremos clasificar, de los que ya sabemos su clase real. Por tanto, a partir de

este conjunto, deberemos inducir un árbol de decisión cuyas hojas clasifiquen bien los datos conocidos. De esta forma, si los datos con clase desconocida tienen una procedencia parecida a los datos del conjunto de entrenamiento, serán correctamente clasificados. O al menos esta es la intención.

Los árboles de decisión también se pueden formar a partir de otros métodos, por ejemplo, a partir de conocimiento experto de una procedencia segura. En nuestra propuesta lo haremos a partir de un algoritmo genético.

Bibliografía

- Beattie, A. (2017). What Was the First Company to Issue Stock?
- Bonde, G. & Khaled, R. (2012). Stock price prediction using genetic algorithms and evolution strategies. In *Proceedings of the International Conference on Genetic and Evolutionary Methods (GEM) (p. 1)*. The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp).
- Elliott, R. & Prechter, R. (1994). *R.N. Elliott's Masterworks: The Definitive Collection*. New Classics Library.
- Engelbrecht, A. P. (2007). *Computational intelligence: an introduction* (segunda edición). Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Esfahanipour, A. & Mousavi, S. (2011). A genetic programming model to generate risk-adjusted technical trading rules in stock markets. *Expert Systems with Applications*, 38(7), 7911-9052.
- Gartley, H. M. (1935). *Profits in the stock market*. Health Research Books.
- Huang, C.-J., Yang, D.-X. & Chuang, Y.-T. (2008). Application of wrapper approach and composite classifier to the stock trend prediction. *Expert Systems with Applications*, 34(4), 2870-2878.
- Kampouridis, M. & Otero, F. E. (2017). Evolving trading strategies using directional changes. *Expert Systems with Applications*, 73, 145-160.
- Koza, J. R. & Koza, J. R. (1992). *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*. MIT press.
- Luke, S. (2013). *Essentials of Metaheuristics* (segunda edición). Disponible en <https://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/Essentials.pdf>. Lulu.
- Mousavi, S., Esfahanipour, A. & Zarandi, M. H. F. (2014). A novel approach to dynamic portfolio trading system using multitree genetic programming. *Knowledge-Based Systems*, 66, 68-81.
- Nair, B. B., Mohandas, V. & Sakthivel, N. (2010). A genetic algorithm optimized decision tree-SVM based stock market trend prediction system. *International journal on computer science and engineering*, 2(9), 2981-2988.

- Potvin, J.-Y., Soriano, P. & Vallée, M. (2004). Generating trading rules on the stock markets with genetic programming. *Computers & Operations Research*, 31(7), 1033-1047.
- Rouwhorst, S. E. & Engelbrecht, A. (2000). Searching the forest: Using decision trees as building blocks for evolutionary search in classification databases. 1, 633-638. Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation.
- Sheta, A., Faris, H. & Alkasassbeh, M. (2013). A genetic programming model for S&P 500 stock market prediction. *International Journal of Control And Automation*, 6(5), 303-314.
- Zhou, C., Yu, L., Huang, T., Wang, S. & Lai, K. K. (2006). Selecting valuable stock using genetic algorithm, 688-694.