

# Modelo de planta propulsiva para motores de radio control.

November 10, 2008

El modelo de planta propulsiva empleado para los aviones de RC estará basado en un motor tipo ENYA 120 FS con las siguientes características:

- Motor de 4 tiempos.
- Cilindrada: 19.93 cc.
- Operado a nivel del mar.
- Peso: 0.910 kg
- Power output: 1.566 kW ( operando a 11,250 rpm)
- Combustible: "glow fuel" : methanol + 5-15 % nitromethane + 16% mínimo de "synthetic castor oil lubricant".
- Hélice de 15 pulgadas (38,1cm) de diámetro.

Del que se proveerá la siguiente información:

- Dependencia de la potencia máxima en bancada en función del cubicaje del motor:  $P_{util}(Vol_{cubicaje})$
- Peso del motor en función del cubicaje del motor:  $W_{engine}(Vol_{cubicaje})$
- Curvas de Tracción en función de la velocidad y la palanca de gases:  $T(V, \delta_T)$
- Curvas del consumo en función de la velocidad y la palanca de gases:  $fc(V, \delta_T)$  (gr/hr)

En las siguientes secciones se describirá cada una de las dependencias descritas anteriormente.

## 1. Dependencia de la potencia máxima en bancada en función del cubicaje del motor: $P_{util}(Vol_{cubicaje})$

La dependencia de la potencia máxima en bancada viene dada por el estudio de una serie de motores alternativos (Saito, OS Engines, Enya, Kavan, RCV ) de 4 tiempos. Dicho estudio viene descrito en Barnard Microsystems Limited ([http://www.barnardmicrosystems.com/L4E\\_4\\_stroke.htm](http://www.barnardmicrosystems.com/L4E_4_stroke.htm)). El cubicaje de los motores del estudio va desde los 7.5 cc del FA-45S de Saito hasta los 53.2 cc del FF-320 de OS Engines, y la potencia asociada a dichos motores va desde 0.522 kW del FA-45S hasta los 3.06 kW del FF-320. Analizando las tendencias de los motores analizados, tal como se puede observar en la 1, se observa que la potencia que se puede extraer del motor viene dada por la relación:

$$P_{out} = 0,073x + 0,031 \quad (1)$$

donde  $P_{out}$  tiene unidades de kW y  $x$  representa la capacidad del motor en centímetros cúbicos (cc). utilizando esta relación se puede determinar cual es la relación de la potencia util en función de cubicaje, del que se puede observar que para el motor que servirá como motor tipo, el ENYA 120 FS, el cual tiene una potencia extraible de  $P_{out} = 1,566$  kW, mientras que con la regresión lineal con el cubicaje del ENYA 120 FS de 19.93 cc produce:

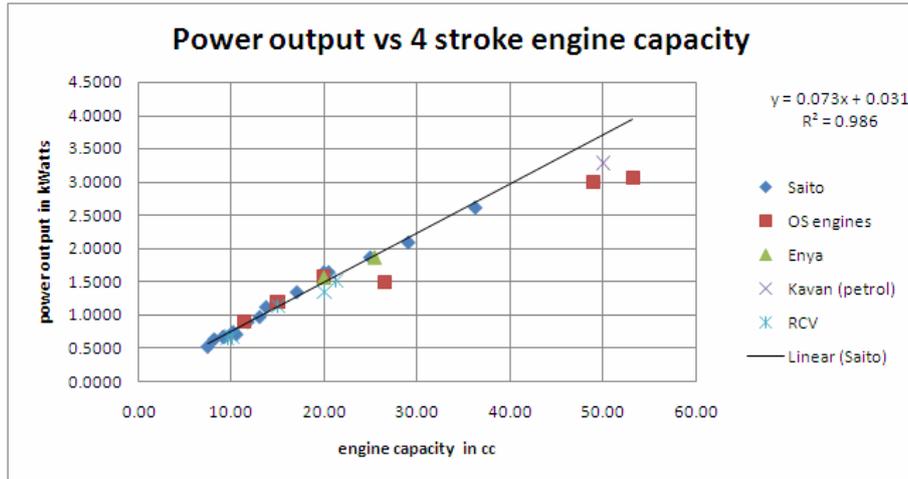


Figura 1: Power output vs. Engine Capacity

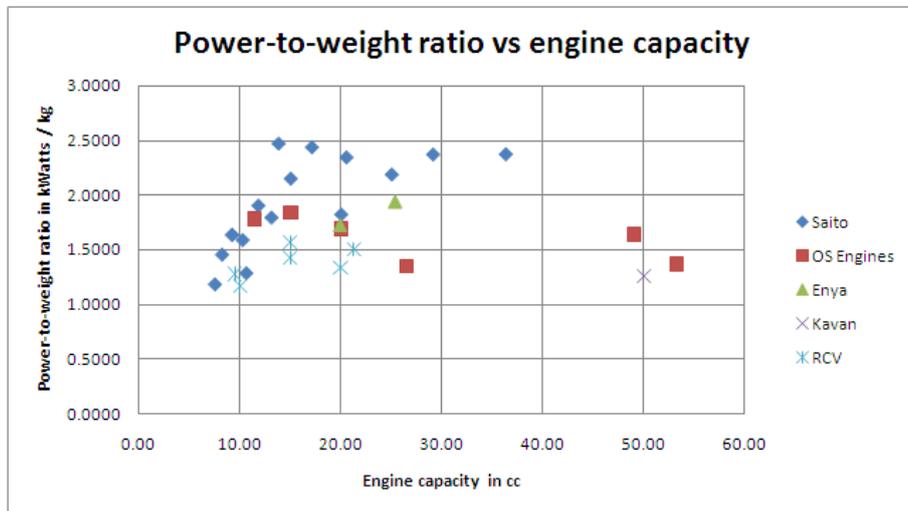


Figura 2: Power to Weight Ratio vs. Engine Capacity

$$P_{out} = 0,073 \cdot 19,93 + 0,031 = 1,4859kW \quad (2)$$

lo que representa una  $P_{out}$  del 94% del valor predecido con la regresión lineal por lo que puede ser tomada como válida para motores de 4 tiempos.

## 2. Peso del motor en función del cubicaje del motor: $W_{engine}(Vol_{cubicaje})$

La dependencia del motor en función del cubicaje del motor se puede obtener analizando los datos de la 2 donde se representa la relación del power-to-weight ratio para todos los motores analizados:

Analizando los valores de la relación entre la potencia y el peso de los motores propuestos para el estudio de 4-tiempos, se puede observar que la media es de 1.727 kWatts / kg, siendo el valor real para el ENYA 12 FS de 1,721kWatts/kg lo que presenta tan solo una desviación del 0,34, por lo que utilizaremos dicha función para determinar el peso de los motores escalados en función del cubicaje necesario de cada motor.

### 3. Curvas de Tracción en función de la velocidad y la palanca de gases: $T(P_{installed}, V, \delta_T)$

Para obtener las curvas de tracción en función de la potencia instalada ( $P_{installed}$ ), la velocidad de vuelo ( $V$ ), y la palanca de gases ( $\delta_T$ ) hay que partir de la hipótesis de potencia inducida ideal para rotores:

$$P_i = T v_i = \frac{T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2\rho A}}$$

donde  $v_i$  es la velocidad inducida. La potencia instalada en un motor que mueve una hélice viene dada por la suma de la potencia inducida ( $P_i$ ) y la potencia de forma ( $P_0$ ):

$$P = P_i + P_0$$

donde  $P_i$  es la potencia inducida por la hélice, o lo que es lo mismo la potencia necesaria para mover una masa de aire a través de la hélice, y  $P_0$  es la potencia de forma, o lo que es lo mismo la potencia necesaria para oponer la resistencia de la hélice a ser movida,  $\rho$  es la densidad del aire o del medio en el que se encuentre, y  $A$  es el área del disco que genera la hélice y viene dada por  $A = \pi R^2$ , donde  $R$  es el radio de la hélice. La potencia disponible por la planta motora tiene que equilibrar ambas potencias por lo que no toda la potencia instalada en un motor es empleada para generar tracción. Aunque hay métodos más complejos para las pérdidas de potencia las cuales se suele considerar que están distribuidas de la siguiente forma:

1. Induced Power: 60 %
2. Profile – viscous drag: 30 %
3. Non-uniform inflow: 5 to 7 %
4. Swirl in the wake: 1 %
5. Tip losses 2 to 4 %

#### 3.1. Tracción en función de la velocidad

Para simplificar el análisis, se va a asumir que la potencia de forma corresponde a una 30% de  $P$ , y que las pérdidas asociadas a la rotación de la estela, pérdida punta de pala, y la velocidad no inducida en la hélice puede ser modelada con el factor de corrección de pérdida de potencia  $\kappa$  tal que la potencia útil viene dada por:

$$\kappa P_i = P - P_0 = P - 0.30P = 0.70P \rightarrow P_i = \frac{0.70}{\kappa} P$$

donde por lo general el coeficiente  $\kappa = 1.15$ , lo que equivale a una pérdida de potencia del 15% por lo que la potencia inducida se estima como un 60.87% de la  $P$  total de la que dispone el motor ( $P_{out}$ )

$$P_i = 0.6087 P_{out}$$

donde  $P_{out} = 1000 \cdot (0.073x + 0.031)$  en Watts y  $x$  cubaje en  $cm^3$  por lo que tenemos que:

$$P_i = \frac{0.70}{\kappa} P_{out} = \frac{0.70}{\kappa} P_{out} = \frac{700}{\kappa} (0.073 \cdot Vol_{cubicaje} + 0.031) = \frac{1}{\kappa} (51.1 \cdot Vol_{cubicaje} + 21.7)$$

Por lo que se observa que la potencia inducida de la planta motora se puede definir en función del volumen de cubaje ( $Vol_{cubicaje}$ ) lo que facilitará al diseñador que potencia puede extraer de

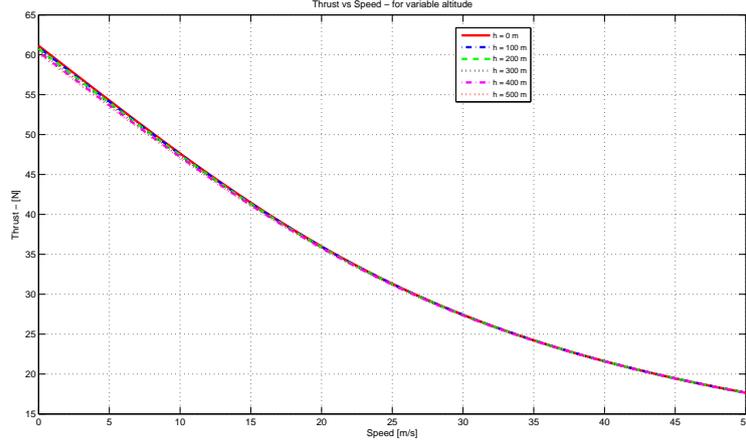


Figura 3: Thrust v.s Speed for Variable Altitude

cada motor segun su cubicaje. Para obtener la tracción del motor en bancada, es decir tracción estática a velocidad cero, podemos definir la potencia inducida en vuelo a punto fijo como

$$P_{i0} = \frac{T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2\rho A}}$$

por lo que la tracción estática viene dada por la siguiente relación:

$$T = \left( P_{i0} \sqrt{2\rho A} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Lo que proporcional la tracción del motor en función de la potencia inducida ( $P_i$ ), densidad ( $\rho$ ) y el área ( $A$ ). Para escalar la información a otro motor de diferente cubicaje se procederá de la siguiente forma:

$$T_N = T_{ENYA} \frac{\left( P_{iN} \sqrt{2\rho_H A_N} \right)^{\frac{2}{3}}}{\left( P_{iENYA} \sqrt{2\rho_{SL} A_{ENYA}} \right)^{\frac{2}{3}}}$$

donde  $T_N$  es la tracción del motor escalado,  $P_{iN}$  es la potencia inducida del motor escalado la cual viene dada por  $P_{iN} = \frac{1}{\kappa} (51.1 \cdot Vol_{cubicajeN} + 21.7)$  donde  $Vol_{cubicajeN}$  es el volumen de cubicaje que se emplea para escalar,  $\rho_N$  es la densidad a la que opera el motor escalado por lo que se incluye la variación de la altitud,  $A_N$  es el área discal del motor escalado,  $T_{ENYA}$  es la tracción del motor ENYA que viene dada por la 3 en función de la velocidad,  $P_{iENYA}$  es la potencia inducida del motor ENYA la cual viene dada por  $P_{iENYA} = \frac{1}{\kappa} (51.1 \cdot Vol_{cubicajeN} + 21.7)$ , la cual viene dada a nivel del mar,  $\rho_{SL}$  es la densidad a nivel del mar donde se ha obtenido la información del ENYA, y  $A_N$  es el área discal del motor ENYA (hélice de diametro de 38.1 cm)

### 3.2. Tracción en función de la palanca de gases

Para obtener la relación de la tracción en función de la palanca de gases (throttle), se hace el mismo analisis desarrollado en la sección anterior en la que la tracción viene dada por

$$T_N = T_{ENYA-\delta_T} \frac{\left( P_{iN} \sqrt{2\rho_H A_N} \right)^{\frac{2}{3}}}{\left( P_{iENYA} \sqrt{2\rho_{SL} A_{ENYA}} \right)^{\frac{2}{3}}}$$

con la única salvedad que la tracción  $T_{ENYA-\delta_T}$  viene dada por la 4 en la que se representa la tracción del motor ENYA a nivel del mar en función de la palanca de gases::

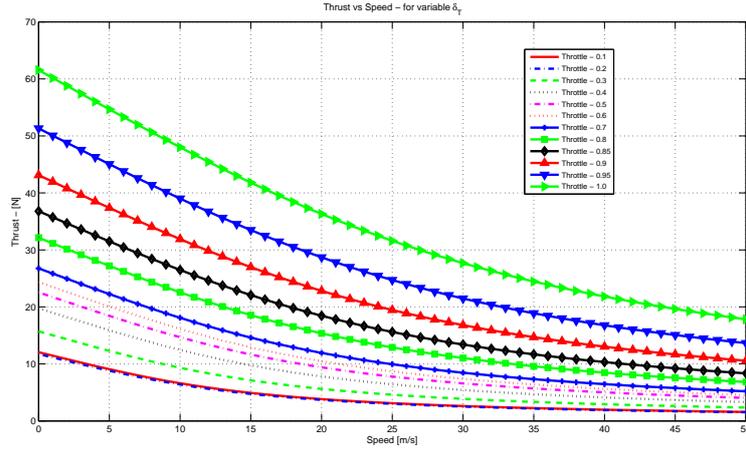


Figura 4: Thrust vs. Speed for variable  $\delta_T$

#### 4. Selección del diametro de helice y RPM de giro

La selección del diametro de helice es una de las selecciones más importantes y hay que seguir una serie de pautas para poder asegurarse de que las velocidades en las puntas de pala de las helice no se ven afectadas por los efectos de compresibilidad y de las ondas de choque a medida que se acercan a valores de Mach supersónico ( $Mach = 1$ ), para ello hay una serie de pautas que hay que tener en cuenta:

1. Una helice NUNCA debería ser utilizada a velocidades de punta de pala superiores a  $M = 0.725$  debido a que los efectos de compresibilidad ya son apreciables a estas velocidades de punta de pala,
2. Se suele tomar como referencia que la velocidad de punta de pala óptima para producir valores bajos de ruido está cercana a  $M = 0.525$

$$a = \sqrt{\gamma RT} = \sqrt{1,4}$$

$$a_{ideal} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}}$$

donde  $R = 8.3145 J \Delta mol^{-1} \Delta K^{-1}$ , es la constante molar del gas,  $M$  es la masa molar en kg por mol, y el valor medio para aire seco es aproximadamente  $0.0289645 kg/mol$ , la temperatura viene dada en grados Kelvin, y para condiciones a nivel del mar ( $20^\circ C$ ), entonces  $T = 293, 15^\circ K$ , y por último, coeficiente de dilatación adiabática, que para gases puede asumirse que es  $\gamma = 1.4000$ , por lo que tenemos que:

$$a_{ideal} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}} = 343.236 m/s$$

Por lo que podemos determinar cual es la velocidad de giro ( $RPM$ ) máxima recomendable para una hélice mediante:

$$RPM = \frac{M \cdot a}{\frac{2\pi}{60} \cdot r}$$

donde  $r$  (m) es el radio de la hélice. Por ejemplo para una hélice de 15 pulgadas, la hélice puede girar a 9033 RPM. Los fabricantes de motores y de helices han creado una serie de tablas en las que

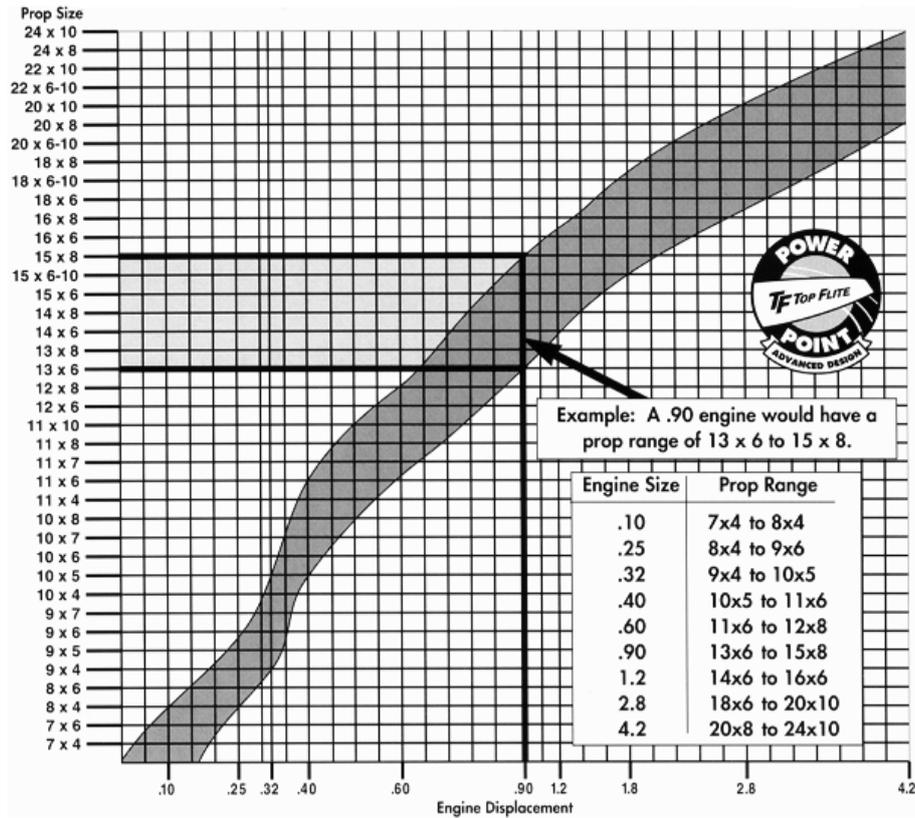


Figure 5: Selección del diámetro de la helice en función del cubicaje del motor

se recomienda el rango de helices que hay que emplear para un motor con un cubicaje específico, por lo que el  $r = r(V_{cubicaje})$ . Dicha información está representada en la 5.

El engine displacement se corresponde al volumen de cubicaje, y las unidades estan en pulgadas cúbicas ( $in^3$ ). Se puede observar que por ejemplo para el motor del ENYA 120 FS que tiene un  $V_{cubicaje} = 19.93cm^3 = 1.216in^3$ , la tabla recomienda las hélices 14x6 a la 16x6, donde el primer número representa el diámetro de la hélice, y el segundo número representa el paso geométrico que es la distancia teórica que la hélice avanzará en la dirección del eje de rotación durante una revolución completa, tal como se puede observar en la Figura 6.

## 5. Curvas del consumo en función de la velocidad y la palanca de gases: $c(P_{util}, V, \delta_T)$ (gr/hr)

Las curvas del consumo de combustible se obtienen de similar forma utilizando como punto de partida las curvas de consumo de combustible (gr/hr) para el motor ENYA, y utilizando como escalado la dependencia lineal del consumo de combustible en función de la variación de potencia tal como se observa en la 6:

por lo que asumimos un modelo para el escalado del consumo de combustible de la forma:

$$f_{c_N} = f_{c_{ENYA}} \frac{P_N}{P_{ENYA}}$$

donde  $f_{c_N}$  es consumo de combustible (gr/h) del motor escalado,  $f_{c_{ENYA}}$  es el consumo de combustible del motor ENYA, el cual se puede obtener de la Figura 8 en función de la palanca de gases ( $\delta_T$ ),  $P_N$  es la potencia disponible del motor escalado,  $P_N = P_{out} = 1000 \cdot (0.073x + 0.031)$ , y  $P_{ENYA}$  es la potencia del motor ENYA,  $P_{ENYA} = P_{out} = 1000 \cdot (0.073x + 0.031) = 1.4859$  kWatts,

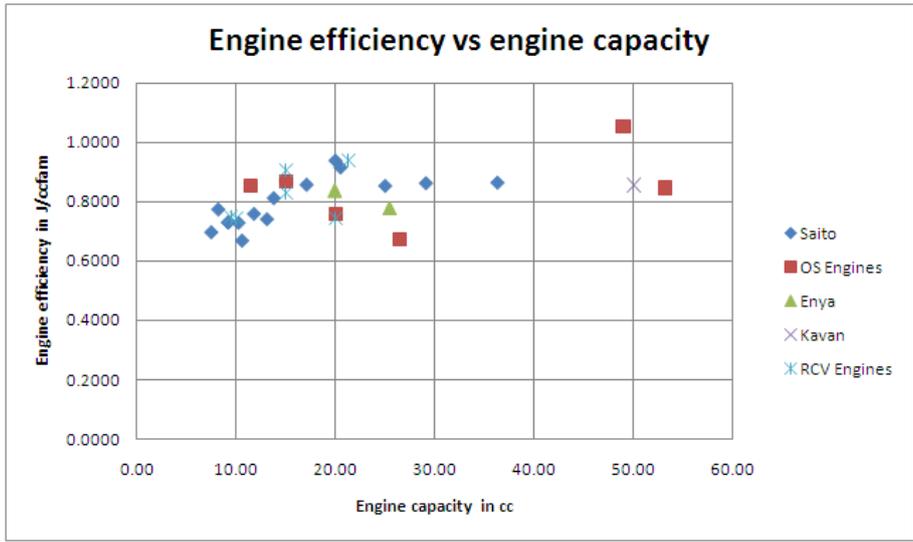


Figure 6: Engine Efficiency vs. Engine Capacity

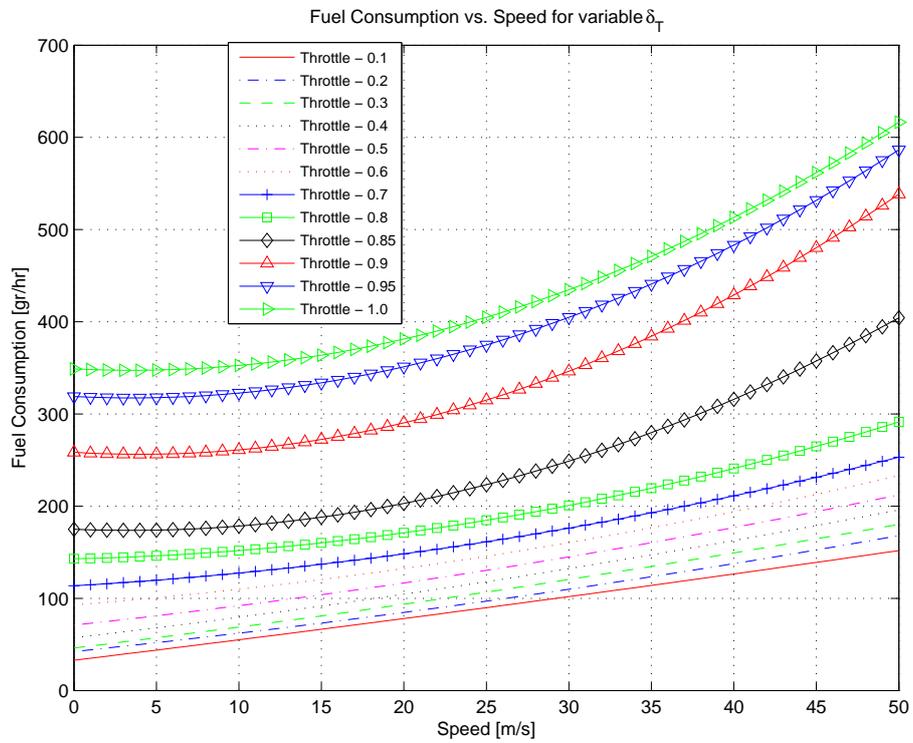


Figure 7: Fuel Consumption vs. Speed for variable  $\delta_T$