

# FCEfyN - UNC - ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

---

DOCENTE: Prof. Esp. Ing. Adrián Claudio Agüero

ALUMNO: Ferraris Domingo Jesus

---



---

## Trabajo practico teorico 3:

---

Rectificacion.

---

### 1. Analisis.

Se hizo un analisis teorico de un circuito **rectificador trifasico de onda completa con carga resistiva pura e inductiva pura**. Ademas uniendo los analisis se sacaron **conclusiones para una carga resistiva-inductiva**.

Para cada caso se pusieron los parametros importantes de los diodos en **funcion de las caracteristicas de la carga**, siguiendo los siguientes pasos:

- Calcular la **corriente media en la carga ( $I_o$ )**.
- Calcular **corrientes media ( $IF_{av}$ ) y eficaz ( $IF$ ) por diodo**.
- **Relacionar corrientes** media y eficaz por diodo con la media de la carga.
- Calcular la **tension media en la carga ( $V_o$ )**.
- Relacionar la anterior con la **tension de pico inversa por diodo ( $VRRM$ )**.

Como ya sabemos vamos a aplicar las siguientes integrales para el **calculo de valor medio y eficaz**.

$$IF(media) = IF_{av} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} iD_{(t)} dt$$

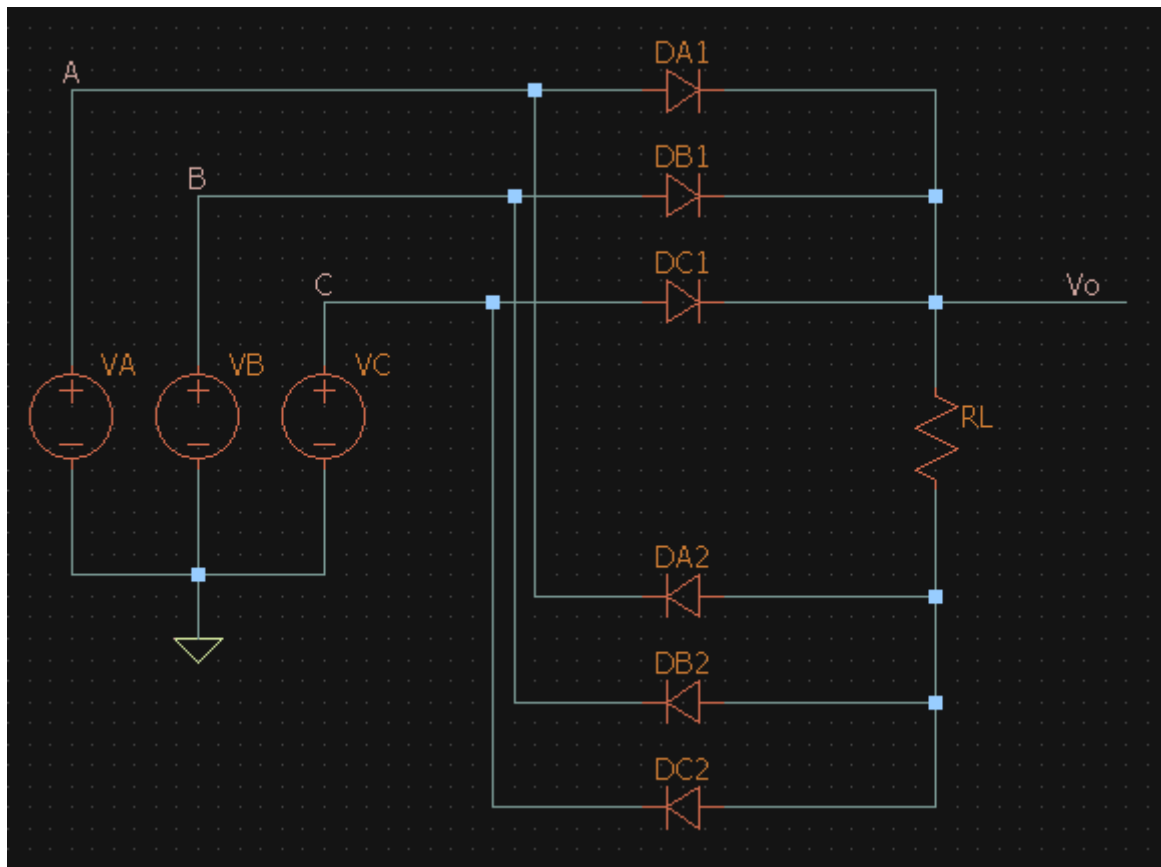
$$IF(ef) = IF = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} (iD_{(t)})^2 dt}$$

$$IL(media) = I_o = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} io_{(t)} dt$$

$$VL(media) = V_o = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} vo_{(t)} dt$$

### Carga resistiva.

Nuestro circuito para el caso de la resistiva pura nos queda:

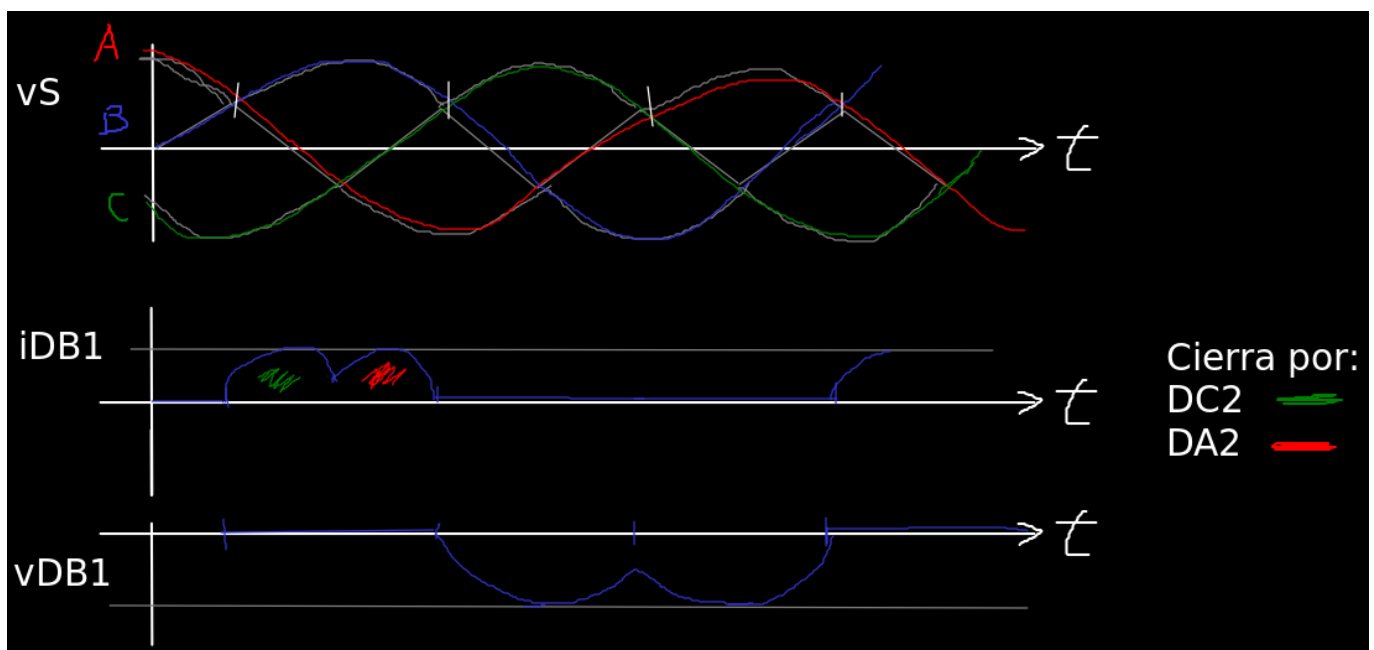


Donde conducirá un diodo por fase y **la corriente retornará por uno de los 2 diodos inferiores alternadamente** en cada ángulo de conducción.

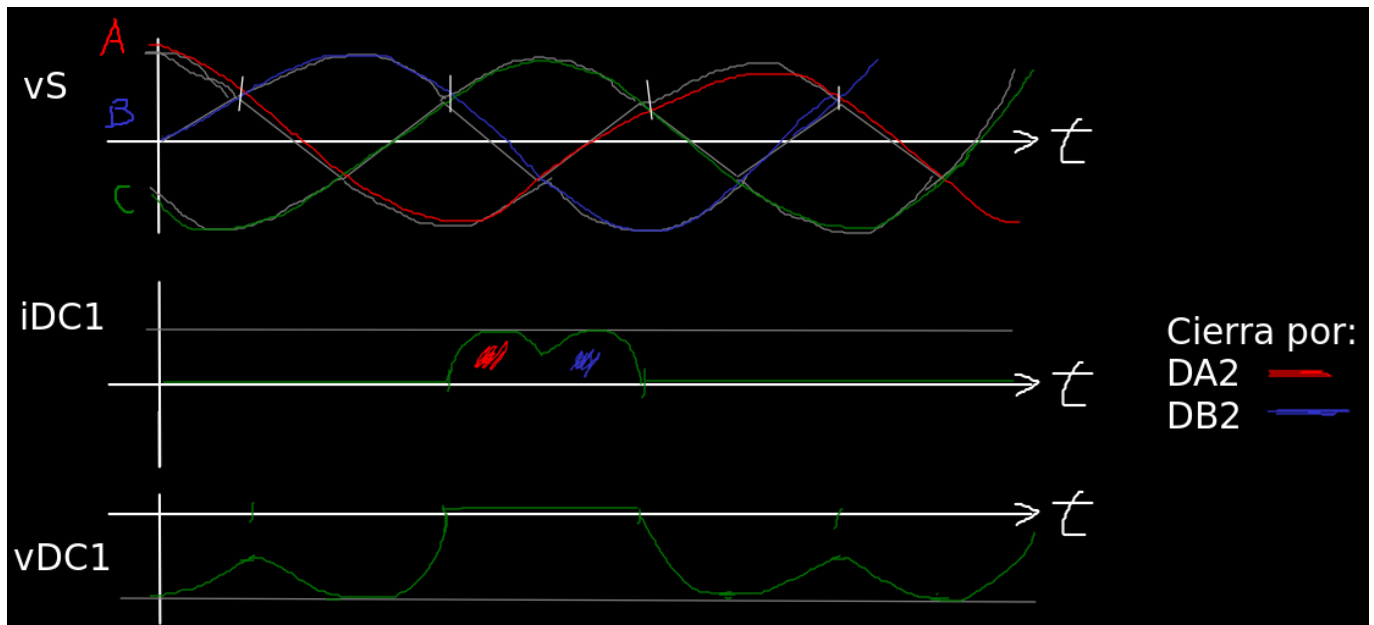
Se analiza la secuencia para sacar las formas de onda de corrientes y tensión inversa:

Cuando la fase B sea positiva hará entrar en conducción al diodo B1 y este cerrará el circuito por medio del diodo C2 la primera mitad del tiempo y A2 la segunda mitad del tiempo.

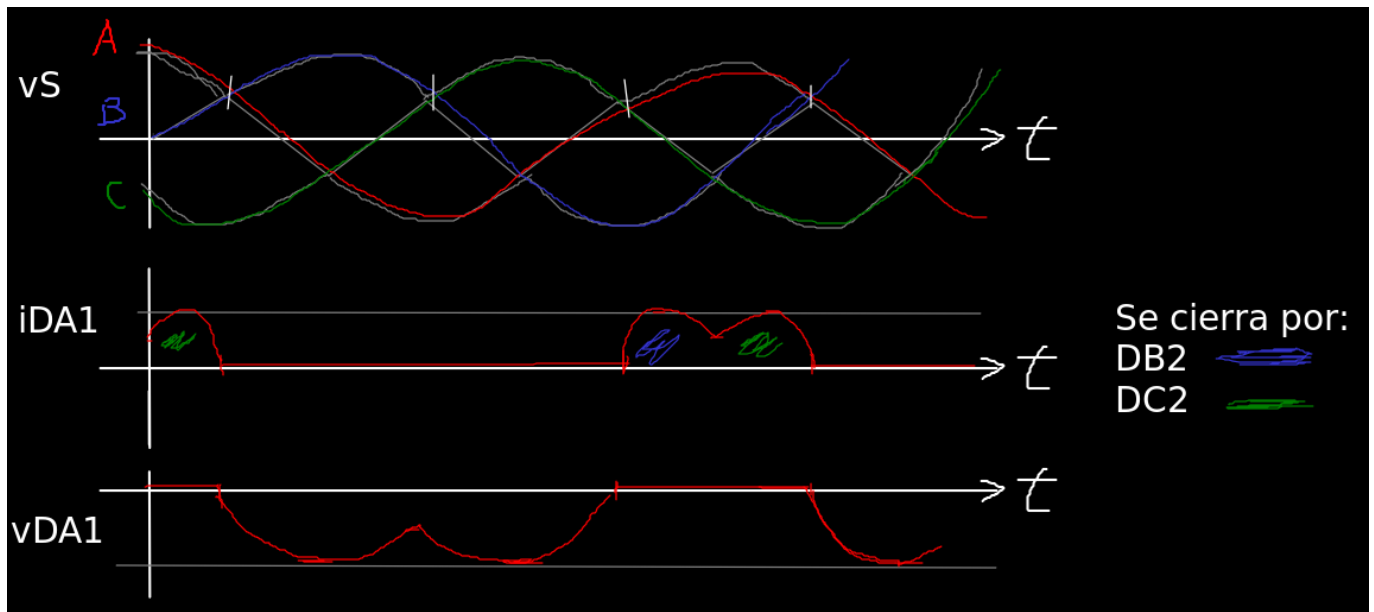
Durante el tiempo que B1 no conduzca, estará en inversa y soportará como máximo una **tensión inversa igual a la tensión de línea**.



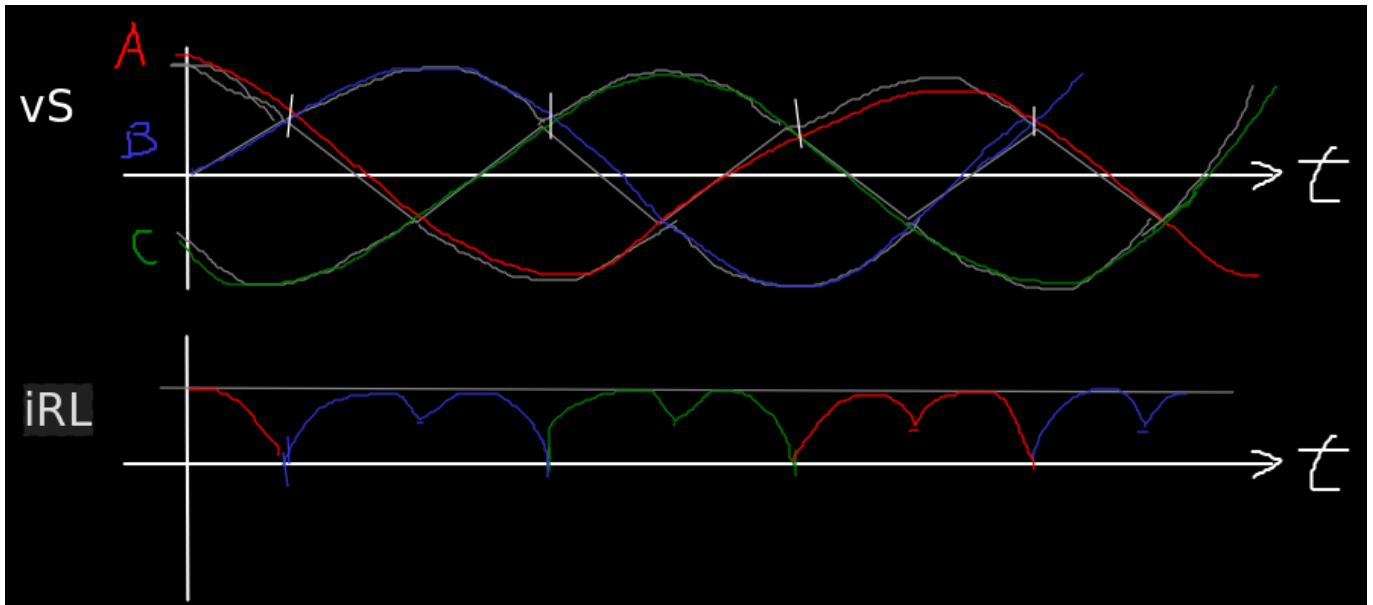
Seguidamente entra en conducción el diodo C1 y cierra por A2 y B2.



Y por ultimo el diodo A1 que cierra por B2 y C2 repitiendo luego toda la secuencia.

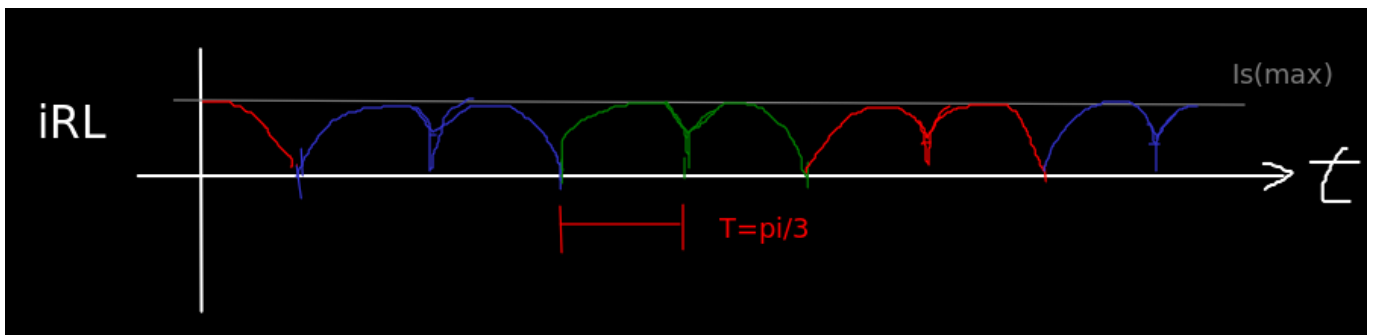


La corriente en la carga sera la **superposicion de todas las fases** aportadas por los diodos, generando una **continua pulsante hexafasica**.



### Calculo de coeficientes

Comenzamos por saber la expresion para la **corriente continua en la carga ( $I_o$ )** basandonos en el grafico analizado y aplicando la definicion de valor medio.

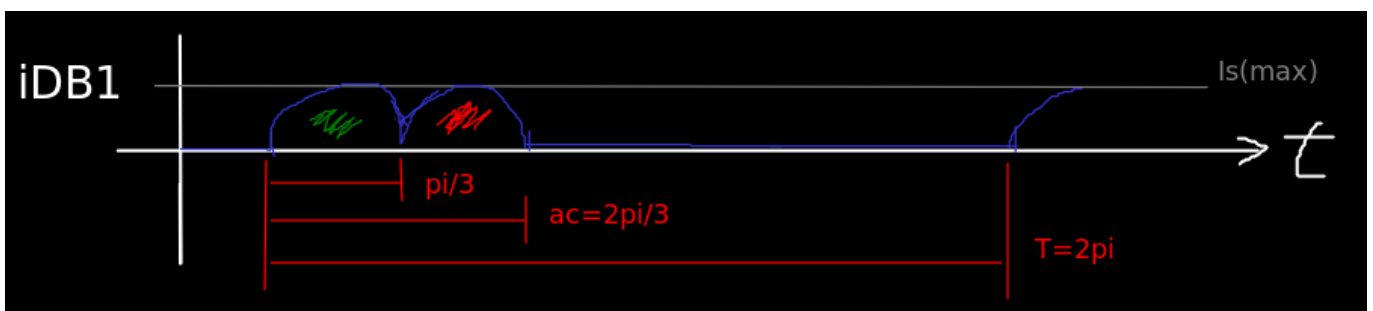


Donde la corriente es continua pulsante y aproximamos los pulsos por cosenos de periodo  $\pi/3$ , que integramos en el intervalo simetrico  $\pm \pi/6$ .

aplicando la definicion de valor medio y con cambio de variable, resolvemos una integral angular:

$$I_o = \frac{3}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} I_{s_p} \cos(\theta) d\theta = 3 \cdot \frac{I_{s_p}}{\pi}$$

Continuamos con el **valor medio y eficaz por diodo ( $I_{Fav}$  e  $I_F$ )** viendo las características de la forma de onda de corriente.



Esta tiene un periodo de  $2\pi$ , un angulo de conduccion de  $2\pi/3$  conformado por 2 pulsos de corriente, cada uno de duracion  $\pi/3$ .

En este caso un pulso de corriente, aproximamos por coseno, e integramos en un intervalo simetico  $\pm \pi/6$ . Finalmente multiplicamos por 2 para tener el valor medio completo.

$$IF_{av} = 2 \cdot \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} I_{sp} \cos(\theta) d\theta \right] = \frac{I_{sp}}{\pi}$$

dividiendo miembro a miembro (m2m)  $IF_{av}$  e  $I_o$ , despejando  $IF_{av}$  tenemos:

$$IF_{av} = \frac{1}{3} \cdot I_o = K_{av} \cdot I_o$$

Y para el valor eficaz:

$$IF^2 = 2 \cdot \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} [I_{sp} \cos(\theta)]^2 d\theta \right] = \frac{2\pi + 3\sqrt{3}}{12\pi} \cdot (I_{sp})^2$$

$$IF = \sqrt{\frac{2\pi + 3\sqrt{3}}{12\pi}} \cdot I_{sp} = A \cdot I_{sp}$$

dividiendo m2m  $IF$  e  $I_o$ , y despejando  $IF$ :

$$IF = \frac{\pi}{3} \cdot A \cdot I_o = \frac{\pi}{3} \cdot \sqrt{\frac{2\pi + 3\sqrt{3}}{12\pi}} \cdot I_o$$

Finalmente:

$$IF = 0.578 \cdot I_o = K_{rms} \cdot I_o$$

Continuamos con la **tension media sobre la carga ( $V_o$ )** aplicando la definicion del valor medio, teniendo en cuenta que sobre la carga cae la tension entre lineas y tiene **FO identica a la de la corriente**.

$$V_o = \frac{3}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} V_{Lp} \cos(\theta) d\theta = \frac{3}{\pi} \cdot V_{Lp}$$

como en este circuito se tiene una tension inversa en los diodos igual a la tension de linea maxima:

$$V_o = \frac{3}{\pi} \cdot V_{RRM}$$

despejando la tension de pico inversa:

$$V_{RRM} = \frac{\pi}{3} \cdot V_o = 1.047 \cdot V_o = K_{RRM} \cdot V_o$$

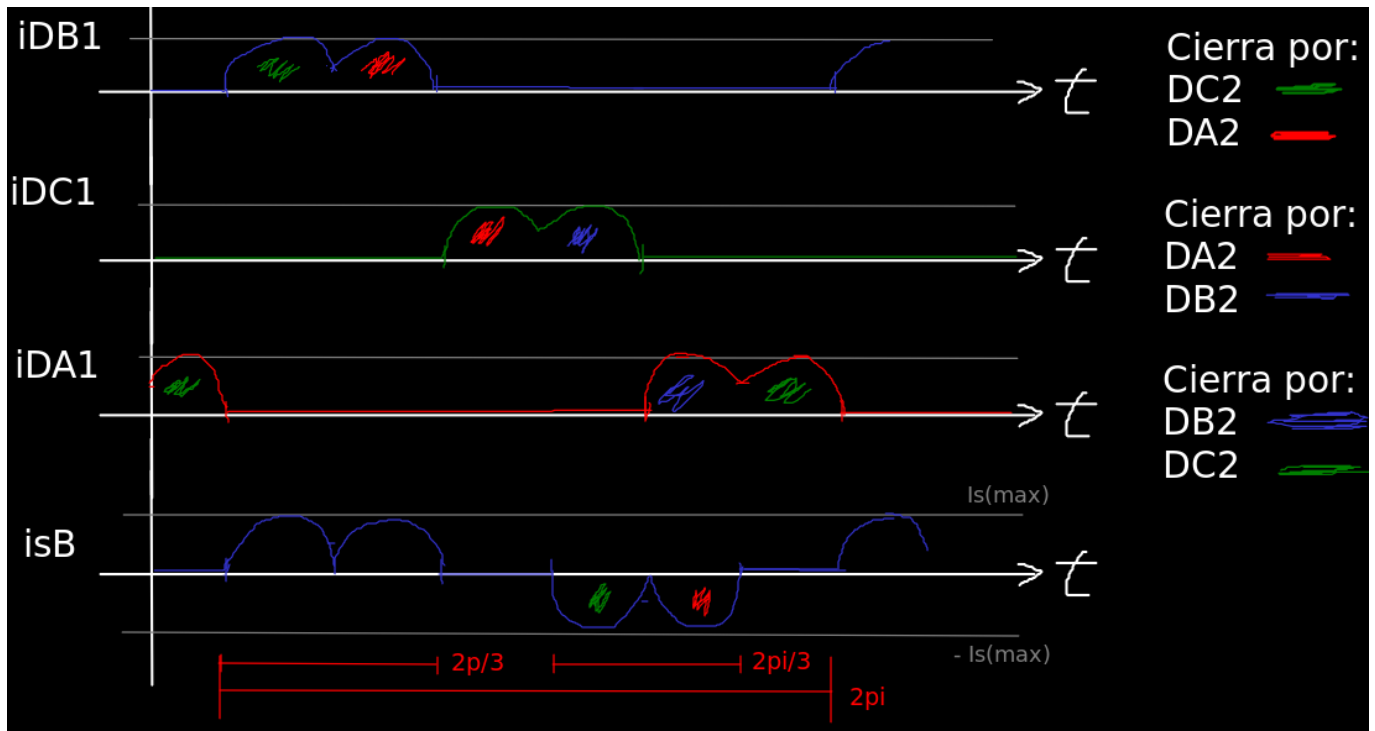
Con lo cual tenemos las **corrientes y tensiones de calculo importante en funcion de la corriente y tension necesaria en la carga**.

Para la **potencia del secundario** primero analizamos las FO de la corriente por fase, luego calculamos su valor eficaz. Como esto queda en funcion de la corriente pico de la fase podemos relacionarla con la corriente media en la carga.

Finalmente sacamos la potencia aparente del secundario como 3 veces la aparente de una fase ( $3 \cdot V_s \cdot I_s$ ).

Para este circuito **la corriente por fase es bi-direccional**, por ejemplo, cuando la tension de la fase B es la mas alta, conduce el diodo B1 generando **2 pulsos de corriente directa**. Pero ademas al conducir A1 o C1 **cerraran parte de su tiempo de conduccion por DB2**, esto genera **2 pulsos mas de corriente inversa por la fase B**.

superponiendo todos los efector tenemos la corriente del secundario por fase B:



Esta es de periodo  $2\pi$ , con 4 pulsos en total, 2 pulsos negativos y 2 pulsos positivos, que duran medio angulo de conduccion cada uno.

calculando el valor eficaz de la corriente de una fase:

$$I_s^2 = 4 \cdot \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} [I_{sp} \cos(\theta)]^2 d\theta \right] = \frac{2\pi + 3\sqrt{3}}{6\pi} \cdot (I_{sp})^2$$

$$I_s = \sqrt{\frac{2\pi + 3\sqrt{3}}{6\pi}} \cdot I_{sp} = B \cdot I_{sp}$$

recordando del analisis anterior que:

$$I_o = 3 \cdot \frac{I_{sp}}{\pi}$$

dividiendo m2m y despejando  $I_s$ :

$$I_s = B \cdot \frac{\pi}{3} \cdot I_o = \sqrt{\frac{2\pi + 3\sqrt{3}}{6\pi}} \cdot \frac{\pi}{3} \cdot I_o$$

$$I_s = 0.817 \cdot I_o$$

Luego sabiendo que la VRRM es la tension entre lineas podemos relacionar el valor eficaz de la fase con la  $V_o$ .

$$V_{RRM} = V_{Lp} = \sqrt{3} \cdot V_{sp} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot V_s = \sqrt{6} \cdot V_s = \frac{\pi}{3} \cdot V_o$$

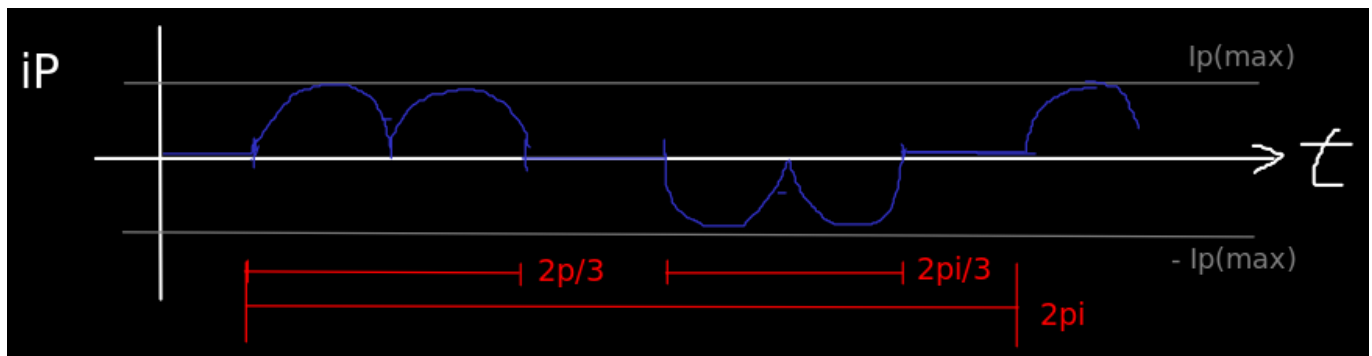
despejando  $V_s$  tenemos:

$$V_s = 0.427 \cdot V_o$$

como la potencia aparente en el secundario es la de las 3 fases tenemos finalmente que:

$$S_s = 3 \cdot V_s \cdot I_s = 1.048 \cdot V_o \cdot I_o = K_s \cdot P_o(av)$$

Ahora para la **potencia del primario** tenemos que tener en cuenta que en el circula la misma **corriente por fase del secundario pero con valor medio nulo** ya que la continua no genera flujo variable en el transformador. Observamos que en este rectificador la corriente por fase del secundario tiene valor medio nulo, por lo que la del primario tendra la misma forma de onda (esto no es asi en un rectificador de media onda).



Solo la amplitud esta afectada por la relacion de transformacion  $n$ .

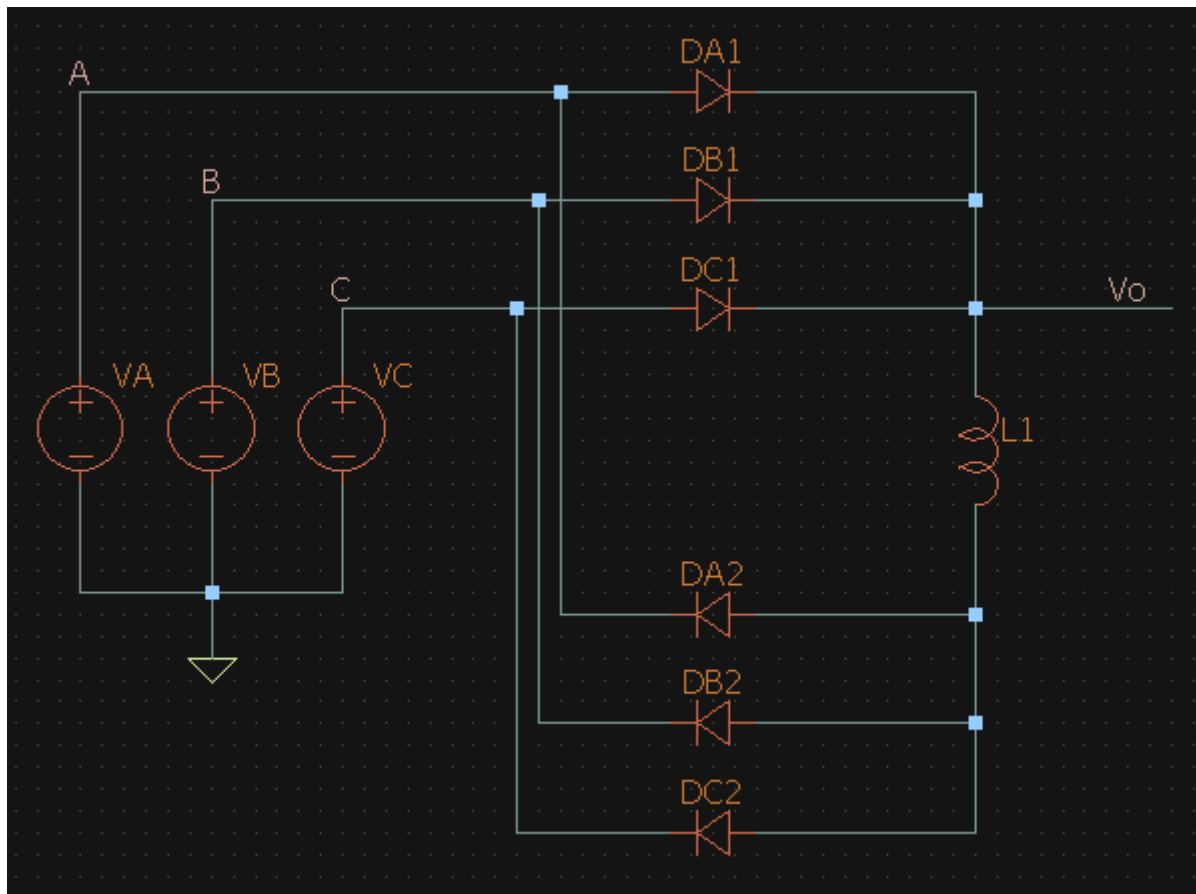
finalmente para la potencia del primario:

$$\begin{aligned} S_p &= 3 \cdot V_p \cdot I_p = 3 \cdot n \cdot V_s \cdot \frac{I_s}{n} \\ &= 1.048 \cdot V_o \cdot I_o = K_p \cdot P_o(av) \end{aligned}$$

Vemos que **la potencia en el primario es igual a la del secundario**, lo cual es normal en estos analisis considerando el transformador ideal y sin perdidas.

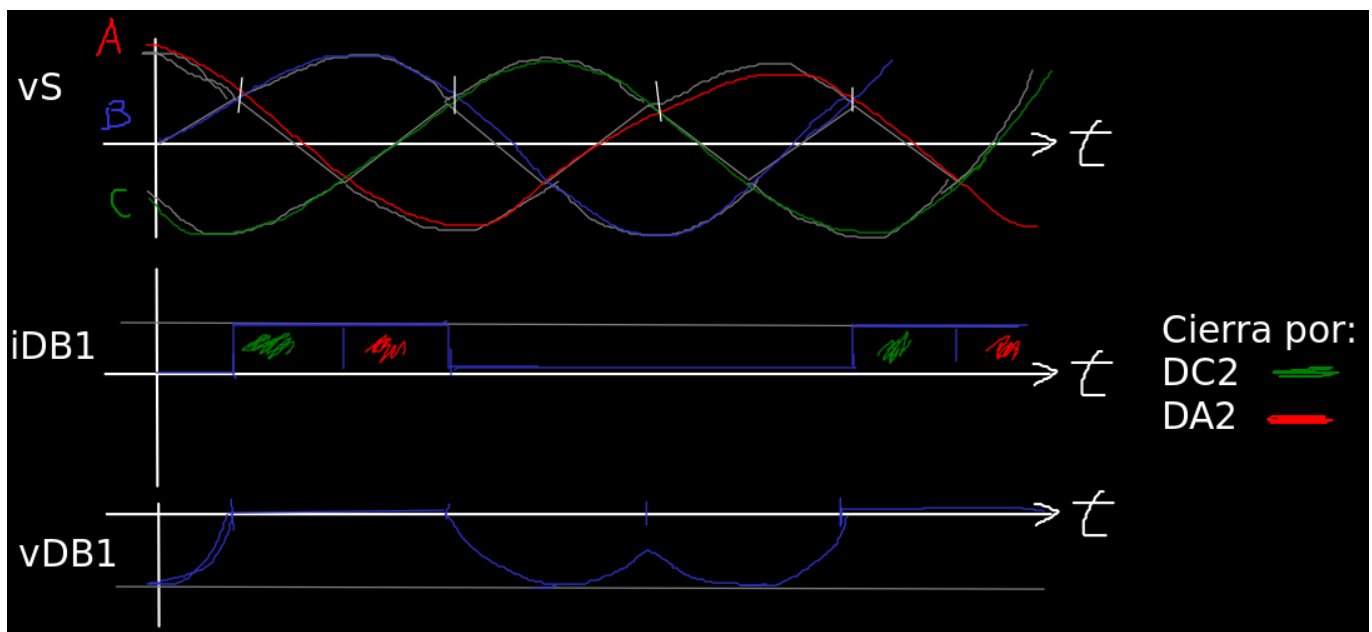
## Carga inductiva.

El circuito analizado es el siguiente:

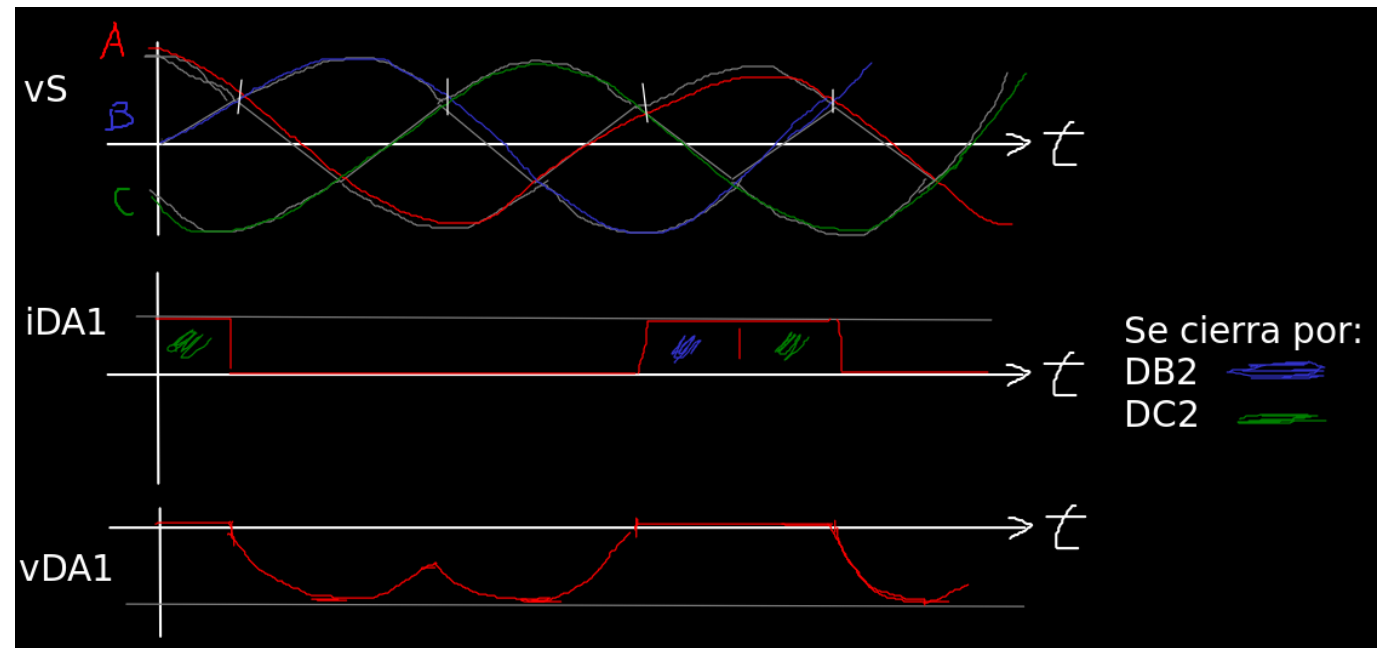
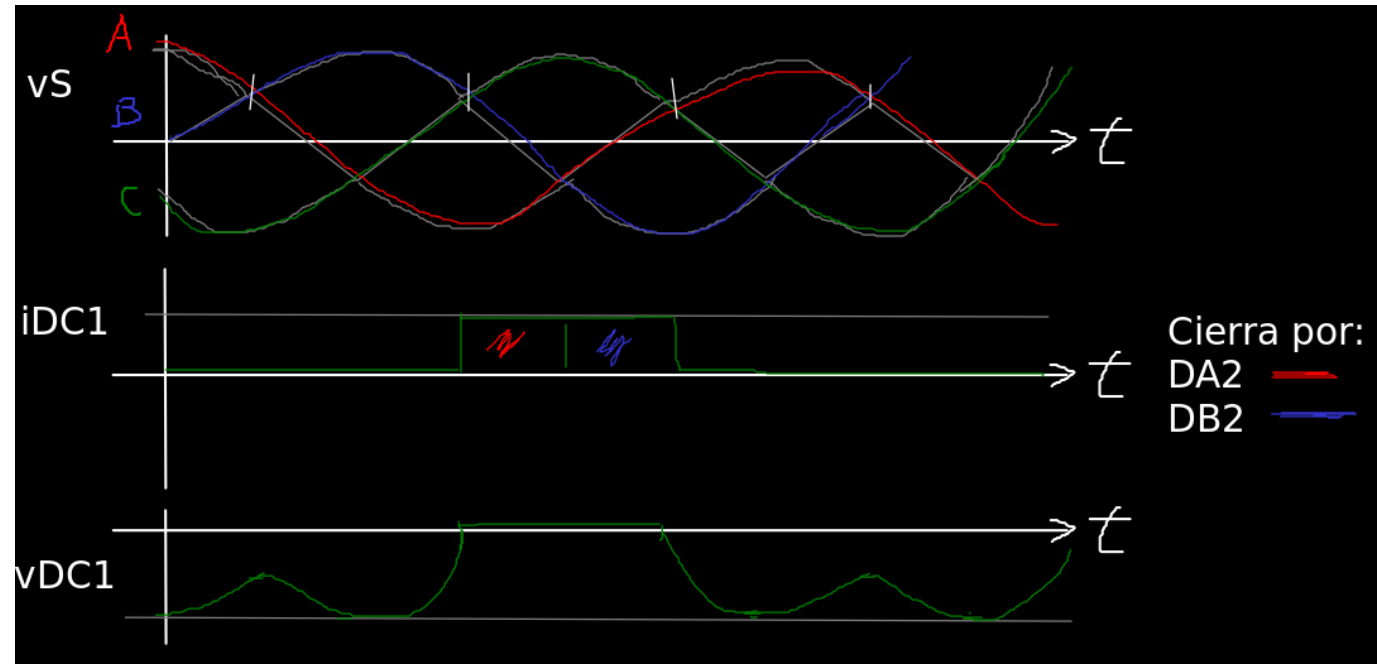


En este caso con carga inductiva ideal, viendo hacia la carga ***se tiene una impedancia muy grande para la corriente de señal***, por lo tanto esta es nula.

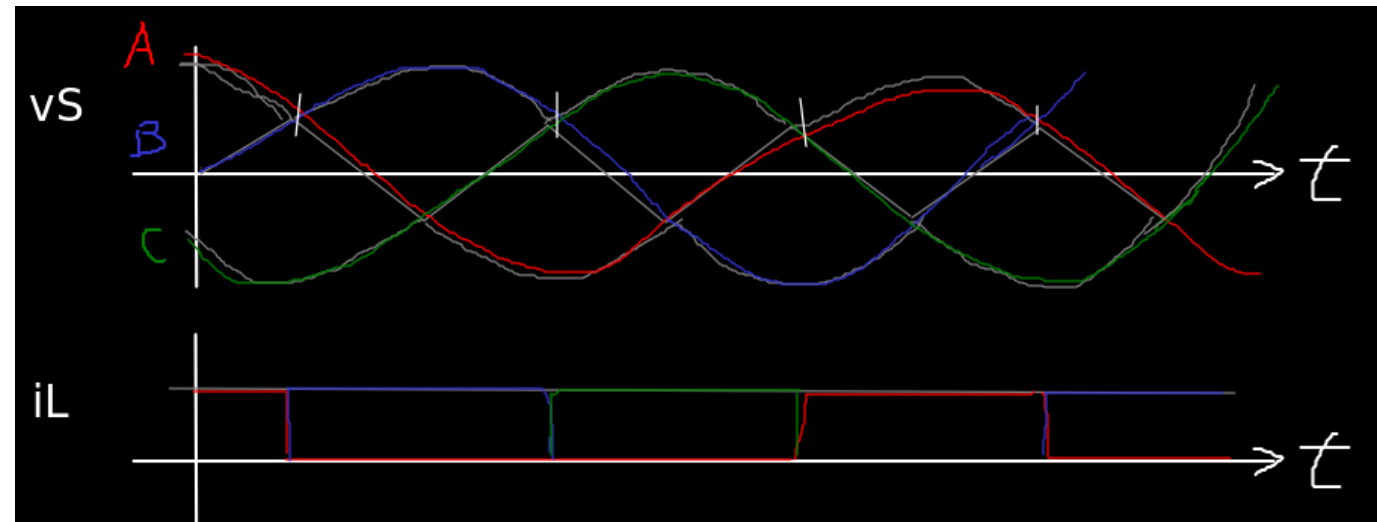
Lo que implica que ***solo hay corriente continua por los diodos*** en forma de pulsos cuadrados de periodo  $2\pi$ .





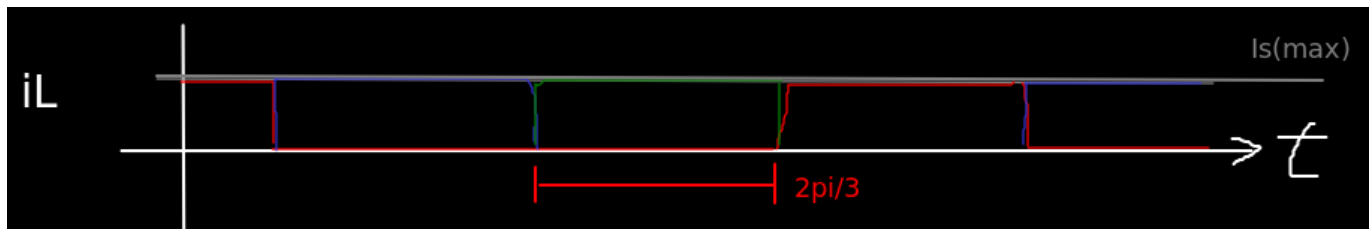


Luego la carga superpone todos los pulsos obteniendo en este caso **una continua pura (en el caso ideal)**.



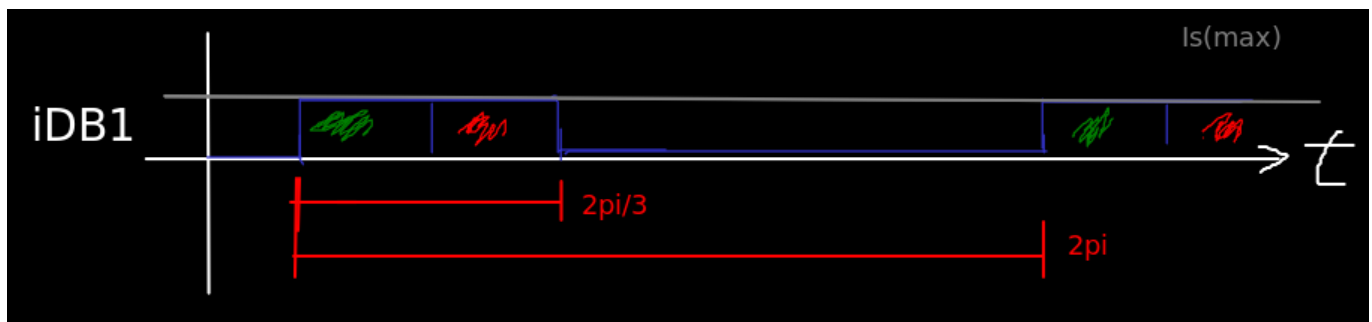
## Calculo de coeficientes

Como la corriente en la carga es continua, busquemos su valor medio durante un angulo de conduccion:



$$I_o = \frac{3}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} I_{sp} d\theta = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{3} I_{sp} = I_{sp}$$

Luego para las corrientes por diodo tomamos un pulso de corriente, aproximamos por rectangulos de base  $2\pi/3$  y altura  $I_{sp}$  (pico).



aplicando definicion de valor medio, tenemos:

$$IF_{av} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} I_{sp} d\theta = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{3} \cdot I_{sp} = \frac{1}{3} \cdot I_{sp}$$

como  $I_{sp}$  es igual a  $I_o$ , tenemos:

$$IF_{av} = \frac{1}{3} \cdot I_o = K_{av} \cdot I_o$$

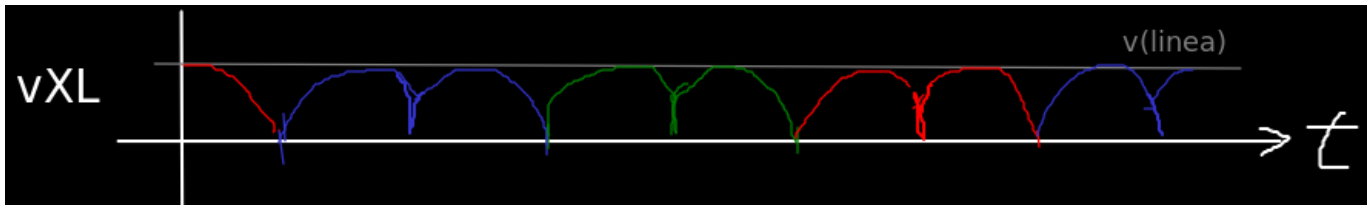
Seguidamente para el valor eficaz por diodo:

$$IF^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} (I_{sp})^2 d\theta = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{3} \cdot (I_{sp})^2 = \frac{1}{3} \cdot (I_{sp})^2$$

tomando raiz cuadrada, tenemos:

$$IF = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I_o = K_{rms} \cdot I_o$$

Para la tension media, como **en el inductor debe caer toda la tension aplicada** tenemos la misma tension que para el caso resistivo.



Luego la tension media sobre la carga es identica a la del caso resistivo.

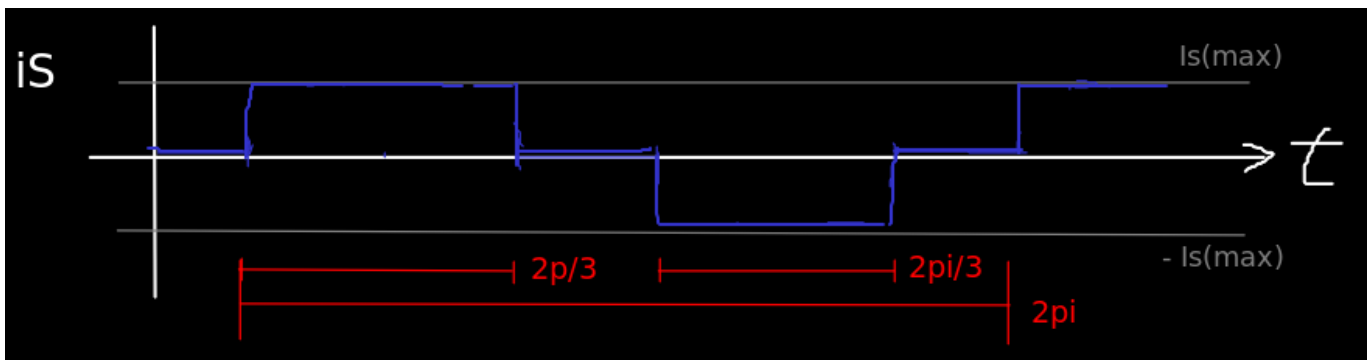
$$V_o = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} V L_p \cos(\theta) d\theta = \frac{3}{\pi} \cdot V L_p$$

de esta forma tenemos tambien la misma VRRM:

$$V_{RRM} = \frac{\pi}{3} \cdot V_o = 1.047 \cdot V_o = K_{RRM} \cdot V_o$$

Si bien en este caso la carga inductiva no disipa potencia activa, si que existe la **potencia aparente del secundario**.

Estudiando la FO de corriente en una fase utilizando el mismo metodo que para el caso resistivo tenemos:



calculando el valor eficaz de la corriente de una fase:

$$I_s^2 = 2 \cdot \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} [I_{sp}]^2 d\theta \right] = 2 \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{3} \cdot (I_{sp})^2 = \frac{2}{3} \cdot (I_{sp})^2$$

$$I_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{sp} = C \cdot I_{sp}$$

recordando del analisis anterior que:

$$I_o = I_{sp}$$

tenemos para la corriente eficaz del secundario:

$$I_s = C \cdot I_{sp} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_o$$

$$I_s = 0.816 \cdot I_o$$

y como tenemos misma VRRM y Vo que en el caso resistivo:

$$V_s = 0.427 \cdot V_o$$

como la potencia aparente en el secundario es la de las 3 fases tenemos finalmente que:

$$S_s = 3 \cdot V_s \cdot I_s = 1.046 \cdot V_o \cdot I_o = K_s \cdot P_o(av)$$

Nuevamente sobre el primario tenemos una corriente con la misma FO del secundario y de amplitud afectada por la relacion de transformacion.

y como seguimos considerando un transformador ideal y sin perdidas, **la potencia del primario es identica:**

$$S_p = 1.046 \cdot V_o \cdot I_o = K_p \cdot P_o(av)$$

### Tabla comparativa final.

Coeficiente K	Carga R	Carga L
Kav	1/3	1/3
Krms	0.578	0.577
Krrm	1.047	1.047
Ks	1.048	1.046
Kp	1.048	1.046

Como conclusiones para este rectificador:

- La IFav por diodo siempre es **un tercio de la Io**.
- La IF (eficaz) por diodo es aproximadamente **uno sobre raiz de tres, por la Io**.
- La VRRM siempre es la tension entre lineas y es igual a **pi sobre tres, por Vo**.

### Conclusion para una carga RL.

En el analisis para la carga inductiva lo importante es destacar que **si bien la tension que cae en el inductor tiene componente alterna, sobre su rama cicula corriente continua**.

Por tanto si cambiamos por una carga RL **aseguramos una corriente continua sobre la resistencia**, lo que tambien da una tension continua sobre la misma, **debiendo caer toda la componente de alterna en el inductor**.

El inductor actua como un **filtro pasa bajo** cortando todas las componentes distintas del valor medio, y sin disipacion (en caso ideal).

## 2. Simulacion rectificador hexafasico.

Se simulo mediante **LTSpice** un circuito **rectificador hexafasico de media onda con carga resistiva**, colocando tensiones de fase desfazadas en multiplos de 60°.

Para una carga resistiva de 5 Ohm se pide una corriente media de 100A: **¿Que tension de fase ponemos?**

para este caso la corriente por diodo tiene periodo 2pi y el angulo de conduccion 2pi/6, primero calculamos la IFav por diodo:

$$IF_{av} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{2\pi}{12}}^{\frac{2\pi}{12}} I_{sp} \cdot \cos(\theta) d\theta = \frac{I_{sp}}{2\pi}$$

sabemos que para el caso hexafasico:

$$IF_{av} = \frac{I_o}{6} = \frac{100A}{6} = \frac{I_{sp}}{2\pi}$$

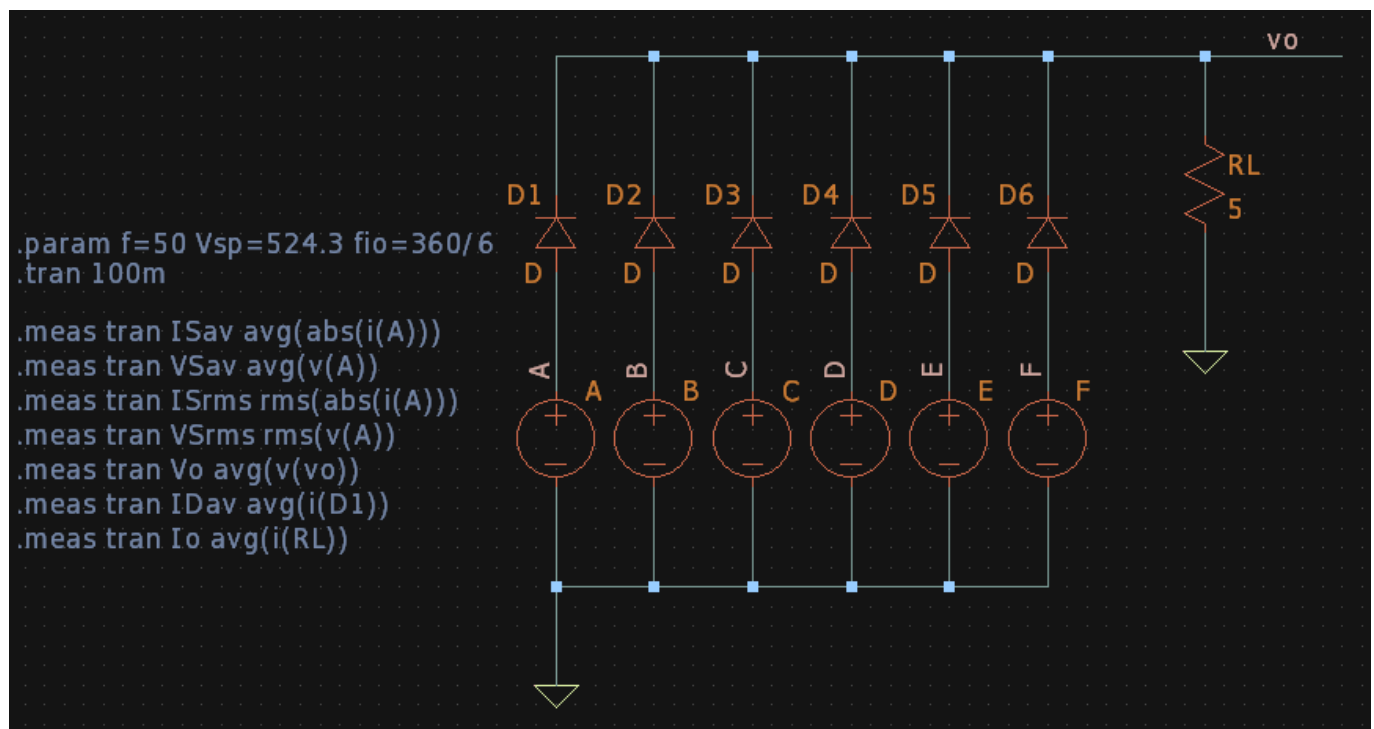
nos da una corriente pico por fase de:

$$I_{sp} = 104.7A$$

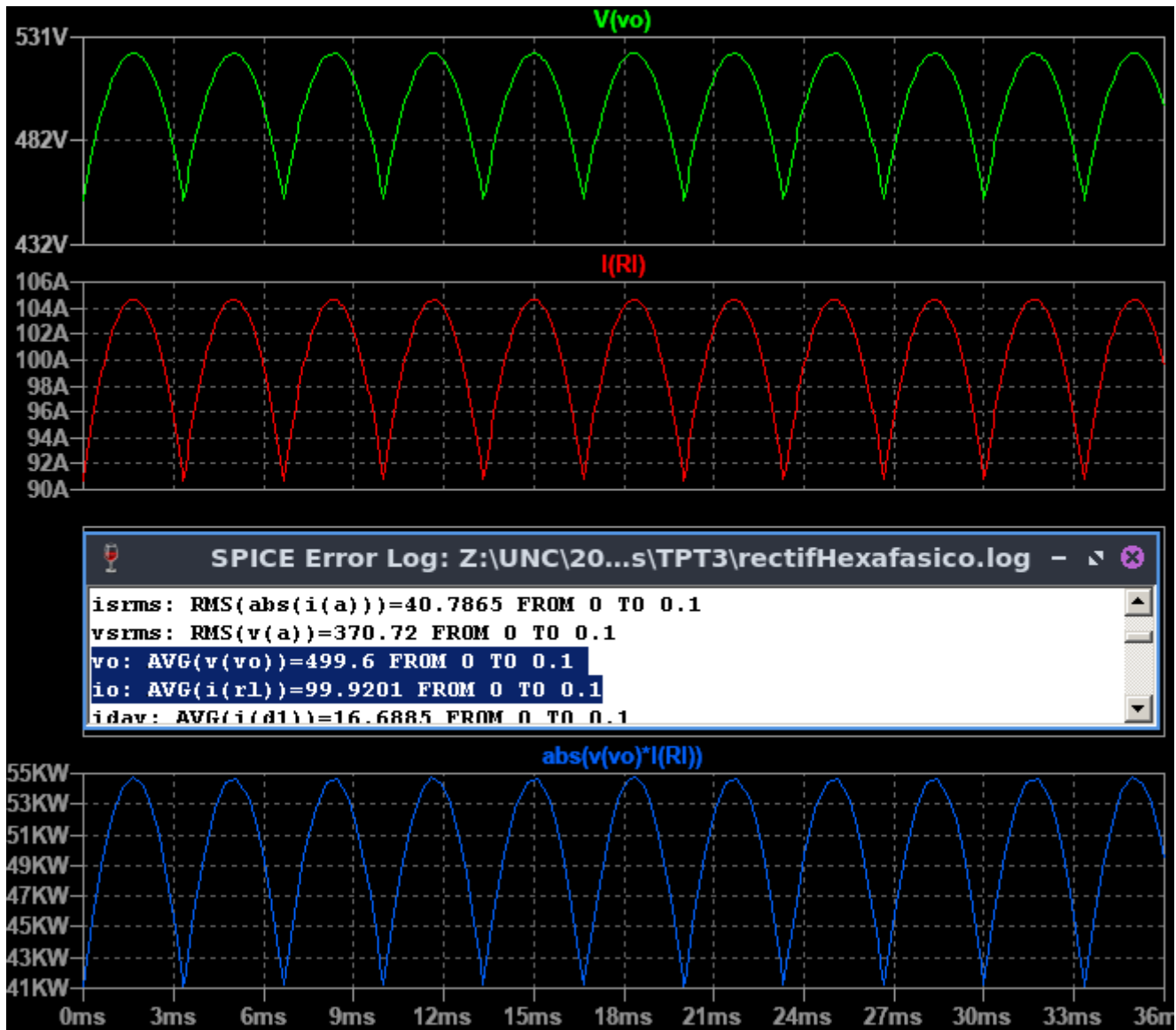
requerimos una tension pico por fase de:

$$V_{sp} = I_{sp} \cdot R_L + 0.7 = 524.3V$$

Quedando el circuito finalmente:



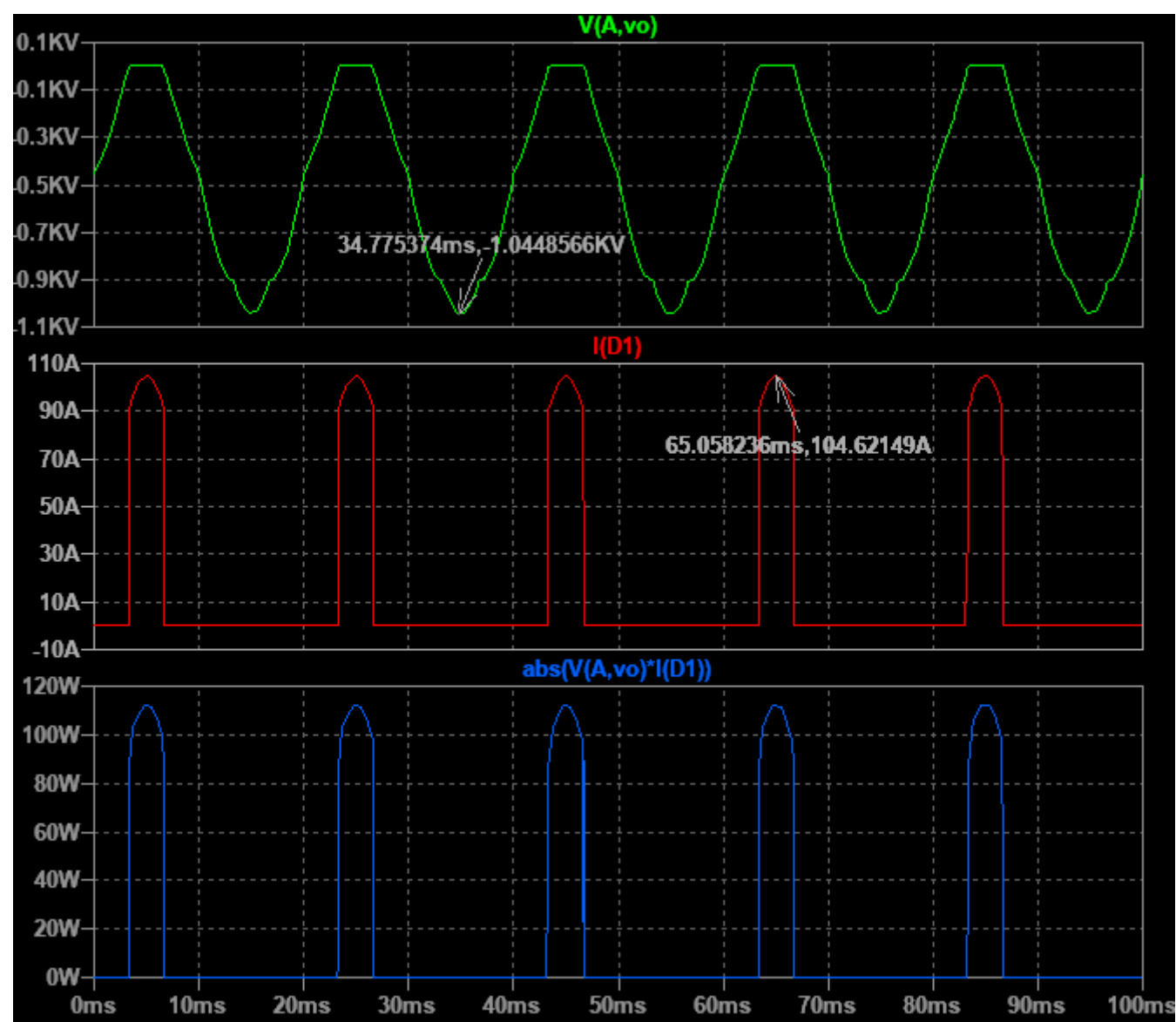
Durante la simulacion vemos que tenemos **corriente continua pulsante en la carga** de periodo  $2\pi/6$  y valor medio 100A.



En los diodos tenemos picos de corriente de 105A aprox. en un intervalo de  $2\pi/6$ , y ***picos de disipacion durante la conduccion***.

sabemos que deberiamos tener una tension pico inversa aproximada de:

$$VPI = 2 \cdot V_{sp} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2q}\right) = 2 \cdot V_{sp} \cdot \cos(15^\circ) = 1.013KV \quad \text{aprox.}$$



Por ultimo vemos todas las fases, el aporte de corriente de la fase A cuando es mayor que las demas, su corriente y tension eficaz y la potencia aparente total del secundario.

