



CAPITULO 5: RESULTADOS

5.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del estudio y el tratamiento estadístico de los mismos. Posteriormente se extraen las conclusiones correspondientes.

5.2. Resultados del estudio

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos mediante experimentación con la herramienta Optquest del software Arena, para cada escenario de los 54 propuestos para cada sistema. Estos escenarios se caracterizan por los diferentes valores de las variables consideradas (TH; Disponibilidad; cv; PR).

En las tablas se presentan como resultados, los valores de WIP y tasa de salida TH, esta última medida en porcentaje respecto de la capacidad del sistema. Seguidos de los valores del número de tarjetas para los que el optimizador ha obtenido el menor WIP, para un TH superior al THmínimo, fijado éste como objetivo a alcanzar por el sistema. Cada una de las tablas representa los resultados para un TH diferente. La primera tabla corresponde a THmin=80% y la segunda tabla a un TH=70%.

| | | cv | PR | SISTEMA | | | | | | | | | |
|--------|-----------|-----|---------|---------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------|---------|----|
| | | | | KANBAN | | | | | CONWIP | | | | |
| | | | | TH | WIP | k ₁ | k ₂ | k ₃ | k ₄ | k ₅ | TH | WIP | k |
| TH=80% | Disp. 100 | 0.1 | 0 | 4,7991 | 90,8852 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4,9991 | 92,8086 | 5 |
| | | | 4 | 4,7382 | 87,7610 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4,9991 | 89,9927 | 5 |
| | | | 8 | 4,6770 | 84,5699 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4,9991 | 87,1030 | 5 |
| | | 0.5 | 0 | 6,0367 | 80,0026 | 1 | 2 | 1 | 2 | 4 | 6,9983 | 81,1188 | 7 |
| | | | 4 | 6,2272 | 80,0641 | 1 | 2 | 1 | 4 | 2 | 6,9983 | 80,1155 | 7 |
| | | | 8 | 7,1374 | 80,1525 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 7,9979 | 81,6308 | 8 |
| | | 0.9 | 0 | 10,8482 | 80,2185 | 1 | 3 | 5 | 6 | 11 | 13,9945 | 80,8896 | 14 |
| | | | 4 | 11,8525 | 80,0333 | 2 | 2 | 6 | 6 | 14 | 13,9945 | 80,0806 | 14 |
| | | | 8 | 11,9218 | 80,0163 | 1 | 4 | 4 | 7 | 7 | 14,9938 | 80,3063 | 15 |
| | Disp. 90A | 0.1 | 0 | 4,6227 | 81,9859 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4,9990 | 84,5676 | 5 |
| | | | 4 | 4,6379 | 80,7656 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 4,9990 | 81,2226 | 5 |
| | | | 8 | 4,6227 | 81,9859 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 5,9987 | 82,1843 | 6 |
| | | 0.5 | 0 | 7,8387 | 80,2959 | 1 | 2 | 3 | 3 | 25 | 8,9971 | 80,1330 | 9 |
| | | | 4 | 8,6256 | 80,1797 | 1 | 2 | 4 | 5 | 1 | 9,9965 | 80,3228 | 10 |
| | | | 8 | 10,5737 | 80,1436 | 2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 11,9952 | 80,4290 | 12 |
| | | 0.9 | 0 | 14,3265 | 80,0647 | 1 | 5 | 6 | 4 | 17 | 17,9916 | 80,2577 | 18 |
| | | | 4 | 15,7869 | 80,1174 | 1 | 5 | 7 | 12 | 1 | 19,9898 | 80,4560 | 20 |
| | | | 8 | 18,2442 | 80,0412 | 1 | 10 | 3 | 19 | 25 | 22,9869 | 80,0316 | 23 |
| | Disp. 90B | 0.1 | 0 | 4,6298 | 82,3471 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4,9990 | 83,4710 | 5 |
| | | | 4 | 4,6335 | 80,4855 | 1 | 1 | 1 | 6 | 1 | 4,9990 | 80,6675 | 5 |
| | | | 8 | 5,3801 | 80,1080 | 1 | 1 | 2 | 1 | 25 | 5,9987 | 82,5893 | 6 |
| | | 0.5 | 0 | 7,9238 | 80,7515 | 1 | 2 | 3 | 6 | 19 | 10,9960 | 80,3158 | 11 |
| | | | 4 | 9,2460 | 80,1598 | 1 | 3 | 3 | 3 | 10 | 11,9953 | 81,3733 | 12 |
| | | | 8 | 11,2657 | 80,5048 | 2 | 2 | 5 | 3 | 7 | 14,9931 | 80,6675 | 15 |
| 0.9 | | 0 | 16,9404 | 80,7186 | 1 | 7 | 4 | 16 | 9 | 23,9861 | 81,0120 | 24 | |
| | | 4 | 19,3026 | 80,1758 | 3 | 2 | 11 | 14 | 15 | 25,9838 | 80,4618 | 26 | |
| | | 8 | 21,3018 | 80,2162 | 1 | 7 | 10 | 20 | 4 | 28,9801 | 80,2473 | 29 | |

Tabla 26. Resultados de la experimentación para TH=80%



| | | cv | PR | SISTEMA | | | | | | | | | |
|------------|--------------|-----|----|---------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------|---------|----|
| | | | | KANBAN | | | | | CONWIP | | | | |
| | | | | TH | WIP | k ₁ | k ₂ | k ₃ | k ₄ | k ₅ | TH | WIP | k |
| TH=70 % | Disp. 100 | 0.1 | 0 | 4,7991 | 90,8852 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3,9994 | 78,2051 | 4 |
| | | | 4 | 4,7382 | 87,7610 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3,9994 | 76,4307 | 4 |
| | | | 8 | 4,6770 | 84,5699 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3,9994 | 74,6248 | 4 |
| | | 0.5 | 0 | 4,4754 | 70,1165 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 4,9991 | 71,4943 | 5 |
| | | | 4 | 5,0084 | 70,7720 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 4,9991 | 70,6072 | 5 |
| | | | 8 | 5,0383 | 72,2075 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 5,9987 | 75,0455 | 6 |
| | | 0.9 | 0 | 6,7943 | 70,0168 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 8,9974 | 72,5769 | 9 |
| | | | 4 | 7,7047 | 70,4499 | 2 | 1 | 4 | 1 | 5 | 8,9974 | 71,9646 | 9 |
| | | | 8 | 7,5364 | 70,1322 | 1 | 2 | 4 | 1 | 4 | 8,9974 | 71,1746 | 9 |
| | Disp. 90A | 0.1 | 0 | 3,9994 | 71,1765 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3,9994 | 71,1765 | 4 |
| | | | 4 | 4,9990 | 81,2226 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4,9990 | 81,2226 | 5 |
| | | | 8 | 4,9990 | 79,0156 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4,9990 | 79,0156 | 5 |
| | | 0.5 | 0 | 5,9986 | 71,2155 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 5,9986 | 71,2155 | 6 |
| | | | 4 | 5,9986 | 70,2633 | 1 | 1 | 2 | 5 | 1 | 5,9986 | 70,2633 | 6 |
| | | | 8 | 6,9981 | 72,4225 | 1 | 1 | 3 | 1 | 14 | 6,9981 | 72,4225 | 7 |
| | | 0.9 | 0 | 9,9971 | 70,3473 | 1 | 2 | 4 | 5 | 1 | 9,9971 | 70,3473 | 10 |
| | | | 4 | 10,9965 | 71,3297 | 1 | 2 | 4 | 7 | 10 | 10,9965 | 71,3297 | 11 |
| | | | 8 | 10,9965 | 70,2394 | 1 | 2 | 5 | 4 | 8 | 10,9965 | 70,2394 | 11 |
| | Disp. 90B | 0.1 | 0 | 22,9869 | 80,0316 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3,9994 | 70,2540 | 4 |
| | | | 4 | 4,6298 | 82,3471 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4,9990 | 80,6675 | 5 |
| | | | 8 | 4,5592 | 78,8273 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 4,9990 | 78,1245 | 5 |
| | | 0.5 | 0 | 4,4925 | 75,1422 | 1 | 1 | 2 | 9 | 1 | 6,9981 | 73,2373 | 7 |
| | | | 4 | 5,2189 | 70,0581 | 1 | 1 | 3 | 2 | 4 | 6,9981 | 72,1997 | 7 |
| | | | 8 | 5,6205 | 70,0283 | 1 | 1 | 3 | 4 | 1 | 6,9981 | 70,4901 | 7 |
| | | 0.9 | 0 | 5,7367 | 70,2531 | 2 | 2 | 3 | 6 | 7 | 11,9959 | 70,2573 | 12 |
| | | | 4 | 9,6891 | 70,0580 | 2 | 2 | 3 | 6 | 10 | 11,9959 | 70,2540 | 12 |
| | | | 8 | 9,7169 | 70,1370 | 1 | 2 | 7 | 6 | 8 | 12,9953 | 71,0079 | 13 |

Tabla 27. Resultados de la experimentación TH=70%

5.3. Análisis y tratamiento estadístico de los resultados.

5.3.1. ANOVA factorial

Se he realizado un análisis ANOVA mediante el uso del programa DOEPACK, un software para el diseño de experimentos.

Los resultados obtenidos confirman que los factores estudiados a los niveles empleados en la experimentación, son todos significativos.

Se ha aplicado la técnica de Pooling, teniendo en cuenta que los efectos producidos por 3 factores o más no suelen encontrarse en la práctica.

La técnica Pooling, se emplea en el caso de experimentos factoriales con tres o más factores que se incluyen en un modelo aleatorio o mixto y en otros diseños más complejos, cuando no existe un estadístico de prueba exacto para ciertos efectos del modelo. Se basa en agrupar ciertos cuadrados medios en el análisis de varianza para obtener una estimación del error con más grados de libertad [64].



A continuación se presenta en la siguiente figura los resultados ANOVA, obtenidos en DOEpack para el WIP.

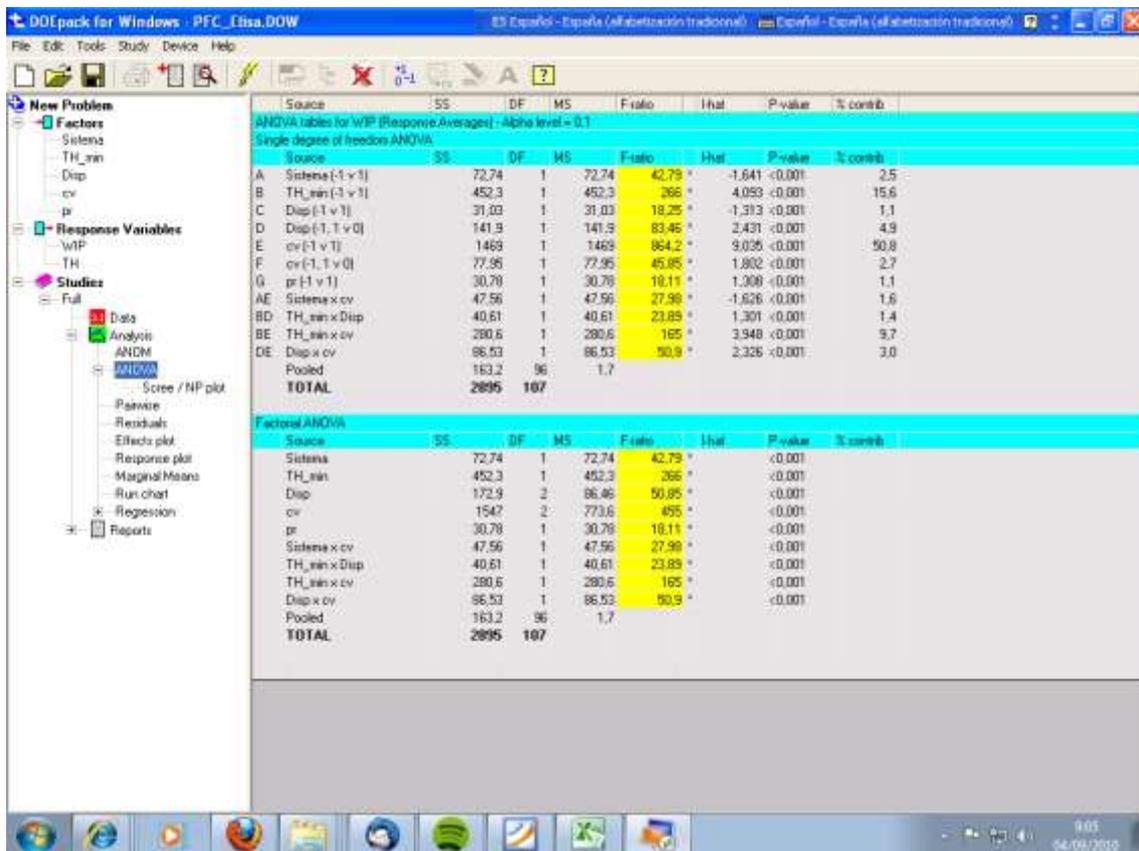


Figura 77. Resultados ANOVA para WIP

De los anteriores resultados se pueden extraer otras conclusiones relacionadas con la influencia de los factores que se han estudiado. En la columna de F-ratio, se ordenan los factores de mayor a menor influencia en el sistema. Por tanto, el factor de mayor influencia será en de Sistema. Es decir la elección de un sistema de control de la producción u otro alterará gravemente el funcionamiento de la línea. El segundo factor de influencia es TH_min, es decir la limitación de throughput mínimo que se ha de alcanzar. Posteriormente la disponibilidad de las máquinas y la variabilidad de los tiempos de proceso. Siendo pr, o porcentaje de piezas reprocesadas, el factor de menor influencia en el sistema.

5.3.2. Gráficas de medias marginales

Del análisis ANOVA no es posible extraer ninguna conclusión respecto a la evolución de la respuesta de acuerdo a la variación de los parámetros considerados. Para poder observar cómo varía la respuesta en función del valor que se le asigne a un determinado parámetro, se han elaborado gráficas de medias marginales mediante Excel. En este tipo

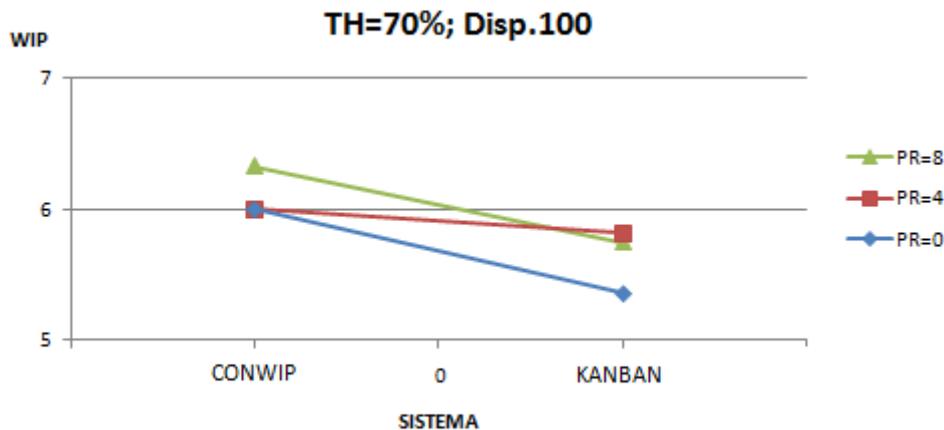


de gráficas quedan recogidos los efectos de la variación de los valores seleccionados para cv o PR y tipo de sistema en la respuesta, que es afectada significativamente por estos factores. Y que por tanto, se considerará la respuesta de mayor interés y la que se incluirá en las gráficas.

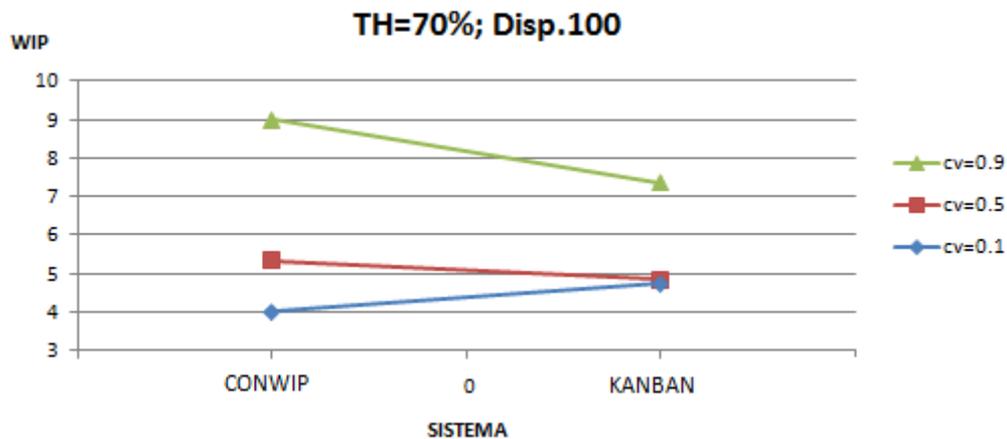
Las gráficas de medias marginales que se presentan responden a los escenarios de simulación propuestos, en concreto serán doce. Seis correspondientes al caso de que THmin sea 70% y otras seis donde THmin será 80%. Dentro de cada grupo existen tres subgrupos de dos gráficas, una para comparar PR, WIP y sistema, la otra para cv, WIP y sistema, que corresponden a las tres posibilidades consideradas respecto a la disponibilidad, $Disp: \{100; 90 \text{ tipoA}; 90 \text{ tipoB}\}$. De este modo, es posible comparar la influencia de la variación de los parámetros PR, cv y tipo de sistema en cada una de las situaciones anteriormente mencionadas.

a. Gráficas medias marginales TH=70%

- Disponibilidad=100%



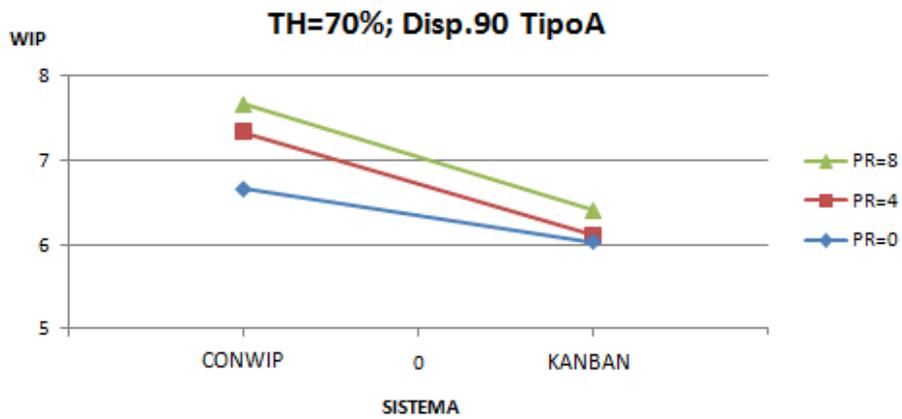
Gráfica 11. Medias marginales WIP vs PR. TH=70%; Disp.=100%



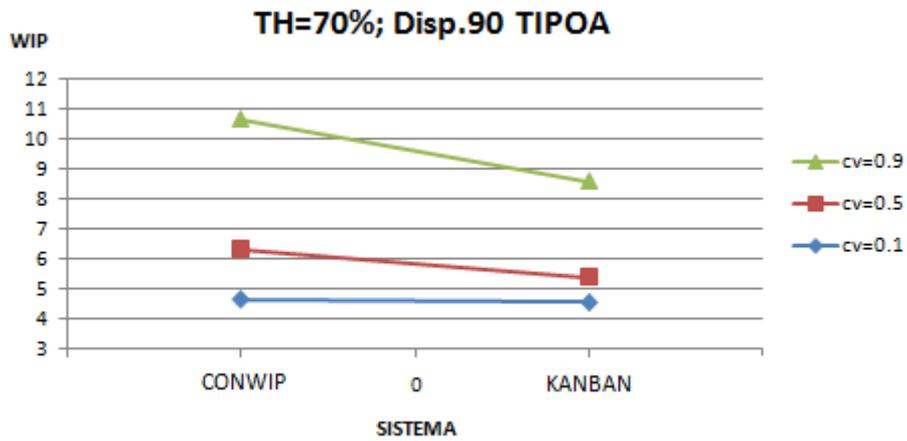
Gráfica 12. Medias marginales WIP vs cv. TH=70%; Disp.=100%



- Disponibilidad=90% TipoA

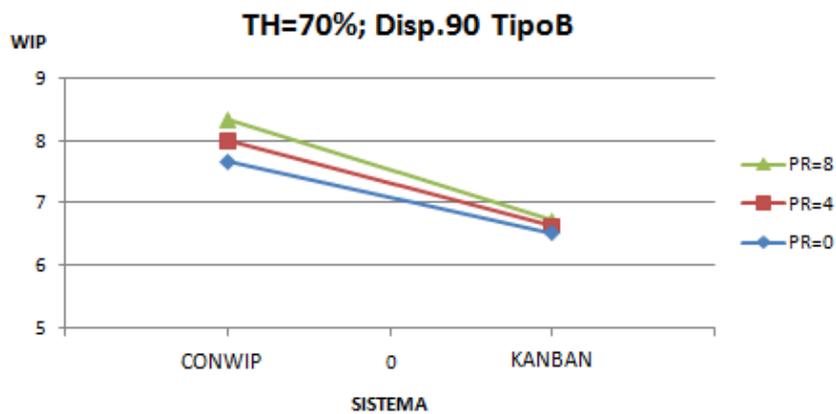


Gráfica 13. Medias marginales WIP vs PR. TH=70%; Disp.=90% TipoA

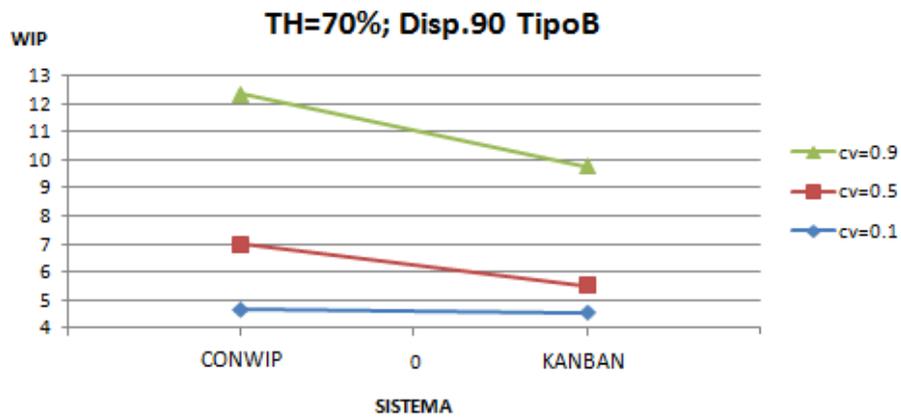


Gráfica 14. Medias marginales WIP vs cv. TH=70%; Disp.=90% TipoA

- Disponibilidad=90% TipoB



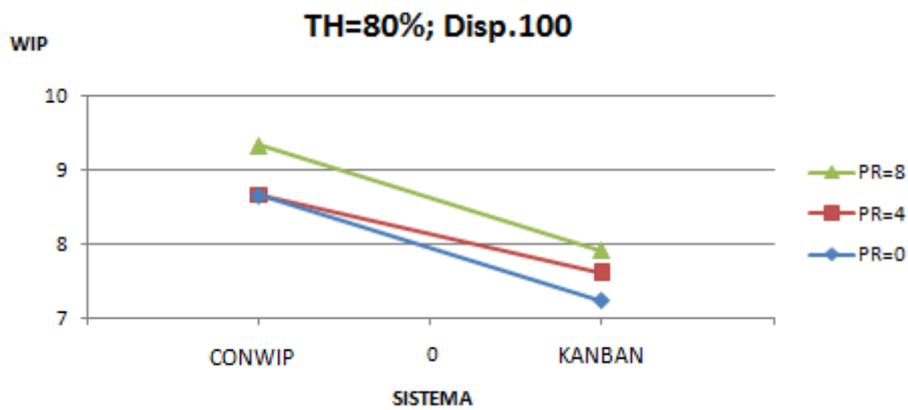
Gráfica 15. Medias marginales WIP vs PR. TH=70%; Disp.=90% TipoB



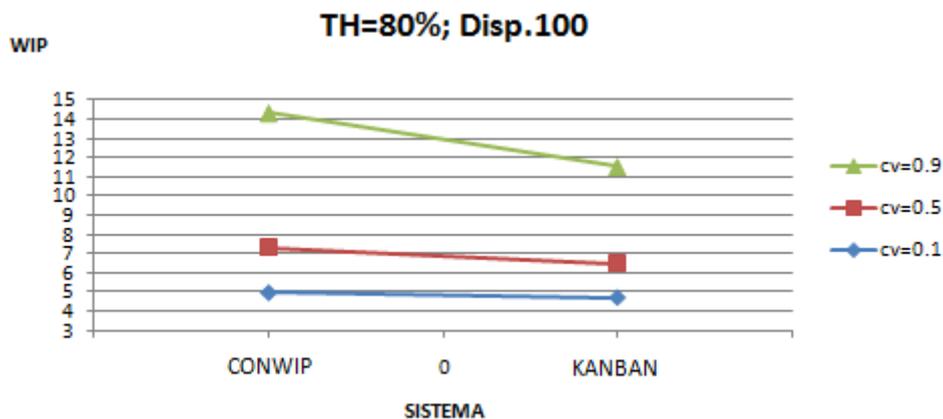
Gráfica 16. Medias marginales WIP vs cv. TH=70%; Disp.=90% TipoB

b. Gráficas medias marginales TH=80%

- Disponibilidad=100%



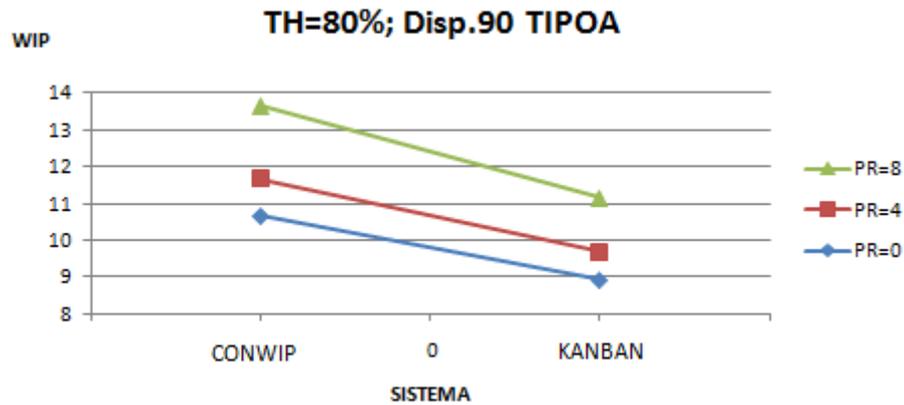
Gráfica 17. Medias marginales WIP vs PR. TH=80%; Disp.=100%



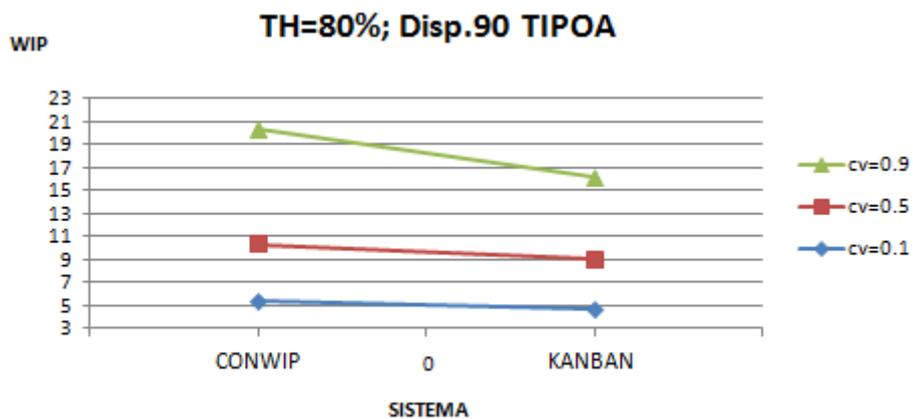
Gráfica 18. Medias marginales WIP vs cv. TH=80%; Disp.=100%



- Disponibilidad=90% TipoA

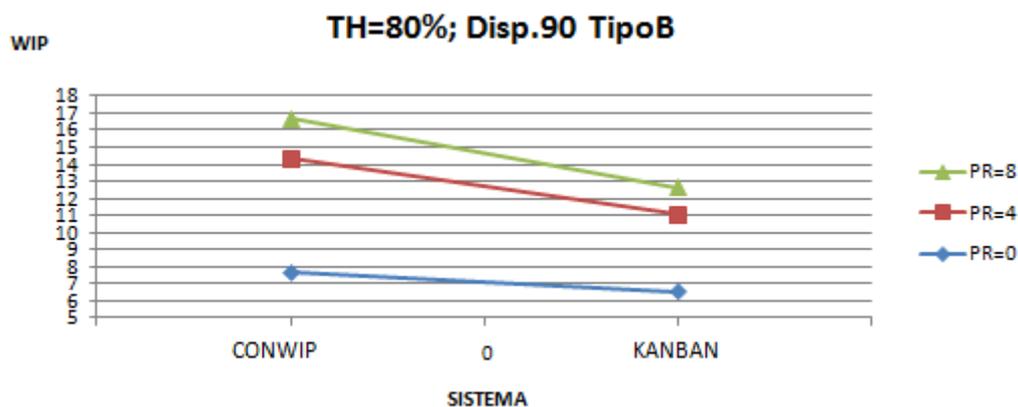


Gráfica 19. Medias marginales WIP vs PR. TH=80%; Disp.=90% TipoA

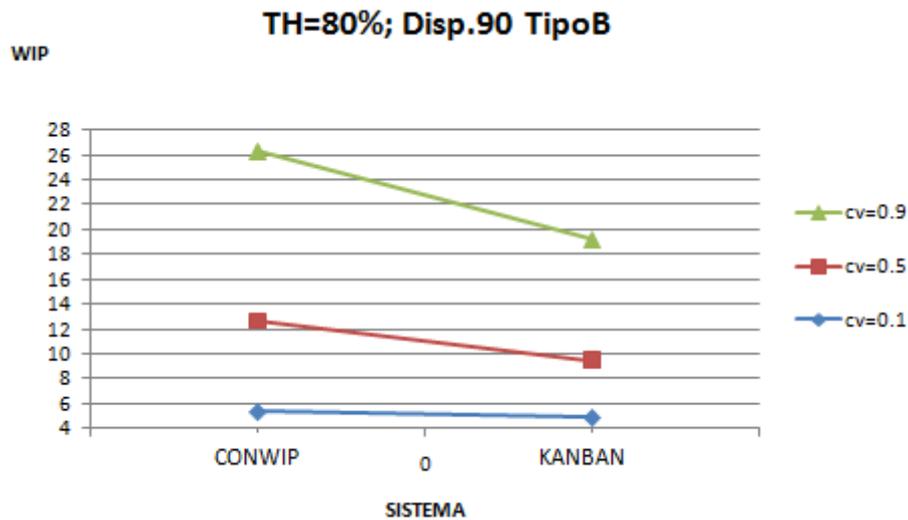


Gráfica 19. Medias marginales WIP vs cv. TH=80%; Disp.=90% TipoA

- Disponibilidad=90% TipoB



Gráfica 20. Medias marginales WIP vs PR. TH=80%; Disp.=90% TipoB



Gráfica 21. Medias marginales WIP vs cv. TH=80%; Disp.=90% TipoB

En estas gráficas, se aprecia un aumento general de WIP de ambos sistemas a medida que PR aumenta. Además se observa, que a medida que aumenta el cv, el WIP aumenta. El aumento del WIP supone un peor funcionamiento de la línea de producción.

De este modo se observa que al aumentar el cv o el PR, el WIP de ambos sistemas aumenta.

Por otra parte se observa, que en general, el sistema Kanban obtiene en promedio un valor de WIP inferior al sistema Conwip. Este efecto se produce en casi todos los escenarios, excepto en el caso de que $cv=0,1$ y $TH=70\%$, es decir cuando la tasa de salida a alcanzar es menor y el sistema es más determinista.

Otro resultado que se aleja de lo general, es para el escenario de $TH=70\%$ y disponibilidad=100%, los resultados de Kanban son peores para $PR=4\%$ que para $PR=8\%$, aunque esta diferencia se puede considerar no significativa.

Respecto al TH, para un mismo tipo de fallo, a medida que éste aumenta, aumenta el WIP.

Si no existen averías en la máquina, es decir, cuando la disponibilidad del sistema es del 100%, en general el WIP es menor que los casos de que existan fallos. En el caso de que existan fallos, el WIP será menor para las situaciones en las que el tiempo medio entre fallos y el tiempo de reparación de la máquina sea menor.

5.3.3. Gráficas de contorno

Para evaluar la influencia conjunta de los parámetros cv y PR sobre ambos sistemas, se hace uso de las gráficas de contorno.

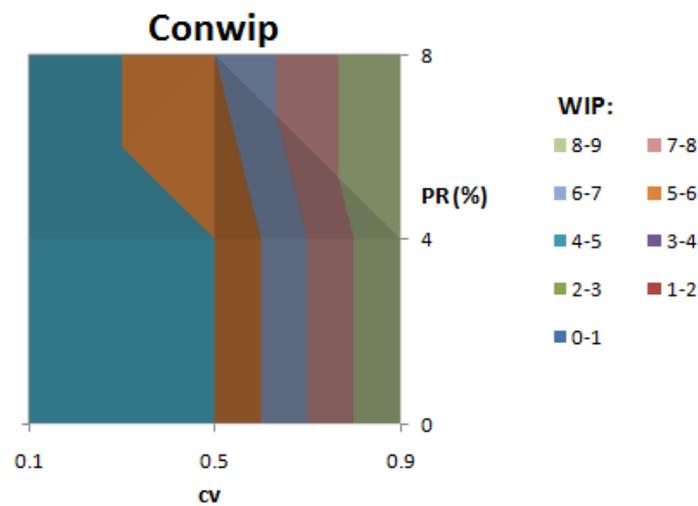


Una gráfica de contorno, es un mapa topográfico de una función. Las líneas unen puntos de la superficie que tienen la misma altura. Por defecto el sombreado de las gráficas es tal que cuanto más alta sea la función esta se ve más clara [65].

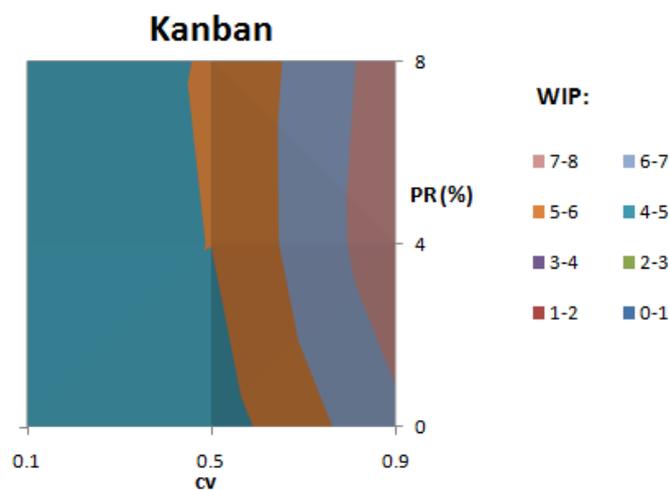
En este caso, se van a realizar dos gráficas para cada uno de los correspondientes tipos de sistemas que se han considerado, caracterizados por la combinación de los valores de TH y disponibilidad. Cada gráfica representa la influencia conjunta de cv y p_R sobre el WIP del sistema. Se presentan las gráficas y a continuación las observaciones que se han realizado, comparando los sistemas Kanban y Conwip en los escenarios correspondientes.

a. Gráficas de contorno TH=70%

- Disponibilidad=100%



Gráfica 22. Contorno. Conwip; TH=70%; Disp.=100% (I)

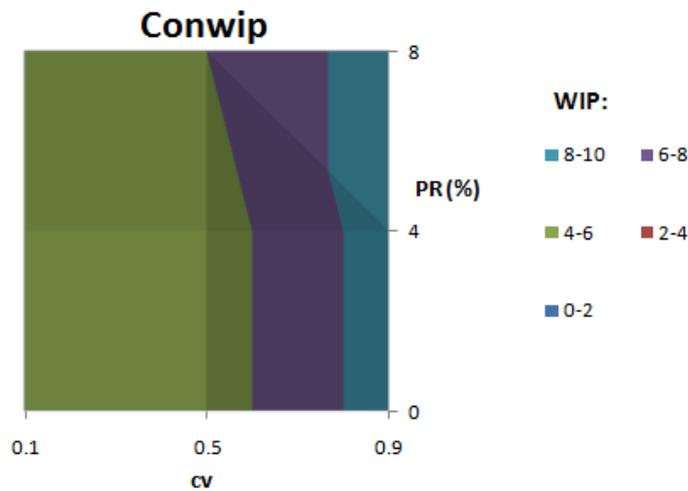


Gráfica 23. Contorno. Kanban; TH=70%; Disp.=100% (I)

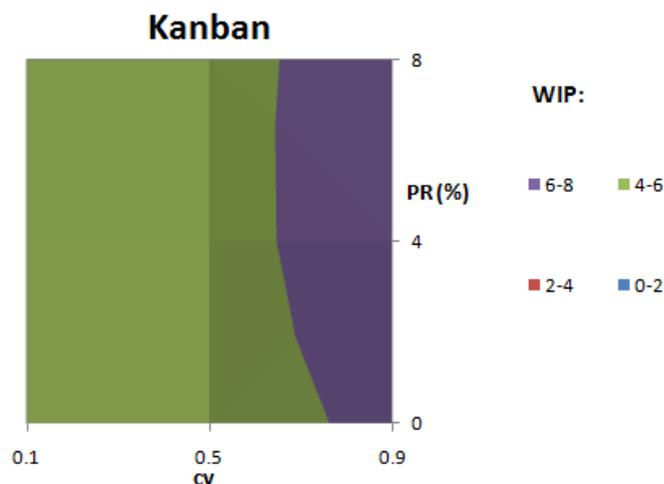


Se puede observar que el sistema Conwip funciona con un WIP más elevado para los coeficientes de variación mayores que 0.5 en todos los casos. En el caso de que sea mayor que 0.5 el deterioro de Conwip es creciente con la cantidad de reprocesados. Ante la combinación de elevado cv y gran cantidad de reprocesados, el sistema Conwip alcanza los peores resultados. El sistema Kanban ofrece un comportamiento más estable para las situaciones más extremas. Por tanto se concluye que la interacción entre ambos efectos es más perjudicial en el sistema Conwip que en el sistema Kanban. Sin embargo, existe una situación en la cual el sistema Kanban funciona peor que el Conwip

Para poder comparar esta situación más fácilmente con la siguiente se ha adaptado la escala de las gráficas anteriores a la misma que las gráficas de TH=70%, Disponibilidad=90% tipo A y tipo B.



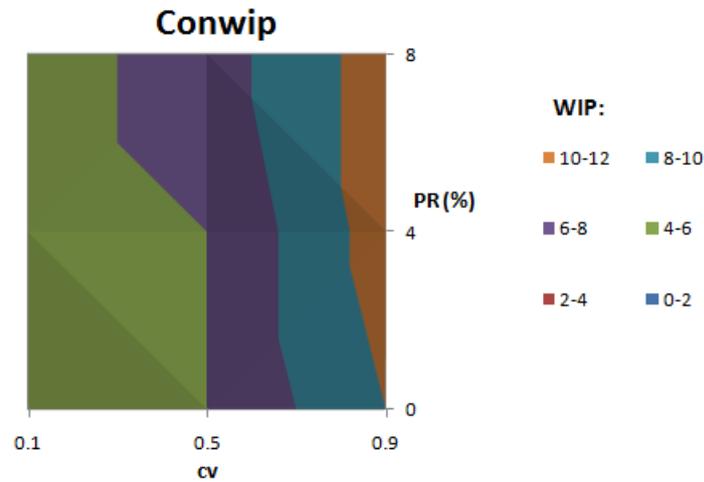
Gráfica 24. Contorno. Conwip; TH=70%; Disp.=100% (II)



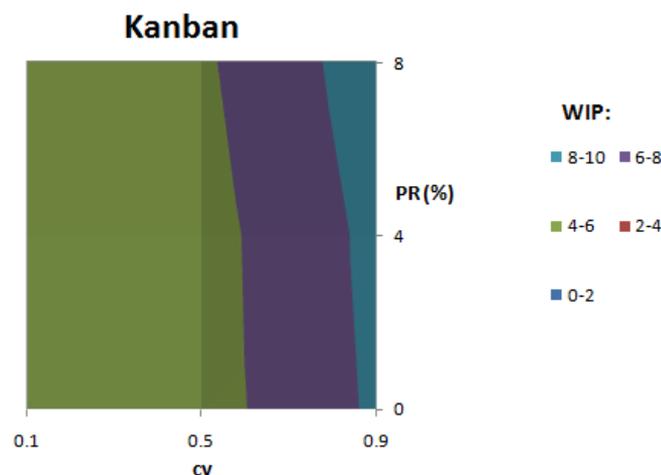
Gráfica 25. Contorno. Kanban; TH=70%; Disp.=100% (II)



- Disponibilidad=90% TipoA



Gráfica 26. Contorno. Conwip; TH=70%; Disp.=90% TipoA

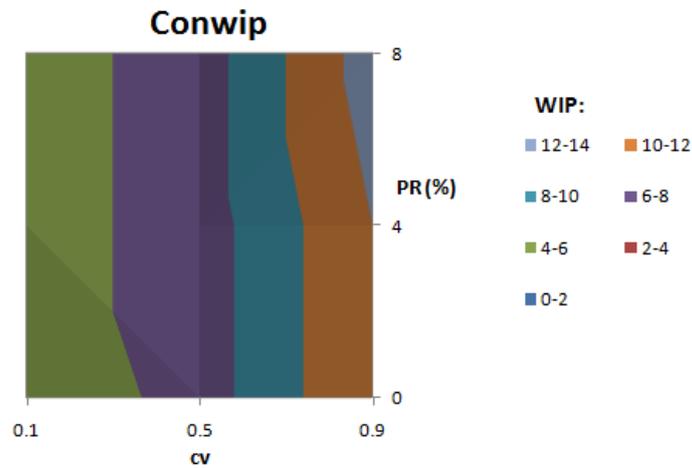


Gráfica 27. Contorno. Kanban; TH=70%; Disp.=90% TipoA

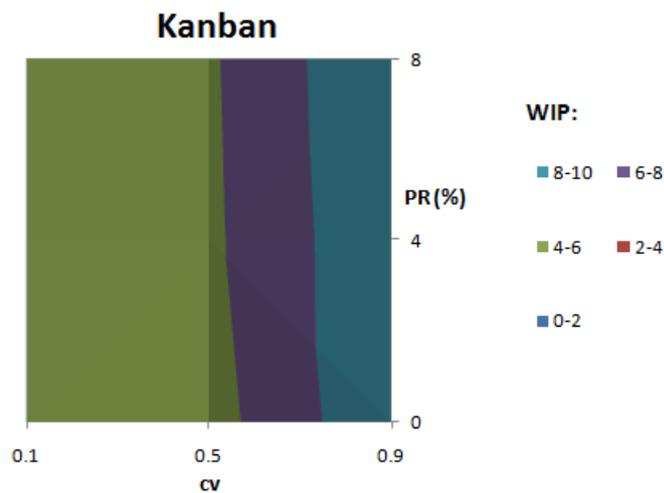
En el caso de la existencia de fallos en la máquina, reducida la disponibilidad de la misma y cuando el MTTF=100min., el sistema Conwip funciona peor que en el caso anterior. A medida que aumenta cv aumentará el WIP. El aumento del porcentaje de reprocesado produce un empeoramiento de la situación en el sistema Kanban y Conwip.



- Disponibilidad=90% TipoB



Gráfica 28. Contorno. Conwip; TH=70%; Disp.=90% TipoB



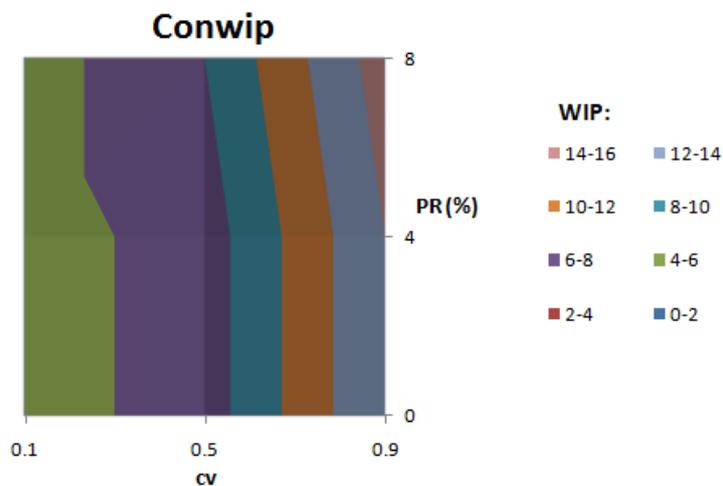
Gráfica 29. Contorno. Kanban; TH=70%; Disp.=90% TipoB

Al igual que en los casos anteriores la acción conjunta del aumento de cv y PR, produce un empeoramiento de ambos sistemas. Aunque el sistema Kanban presenta un mejor funcionamiento que el Conwip. El aumento del valor de MTTR y MTBF, produce un empeoramiento en ambos sistemas, mayor en el sistema Conwip que en el Kanban.

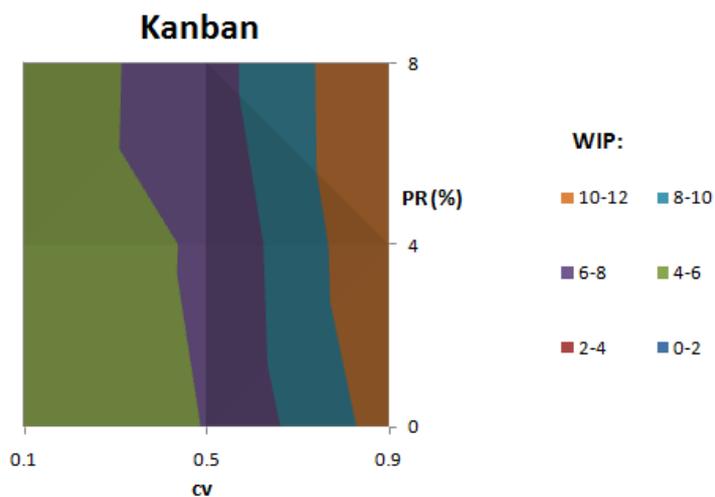


b. Gráficas de contorno TH=80%

- Disponibilidad=100%

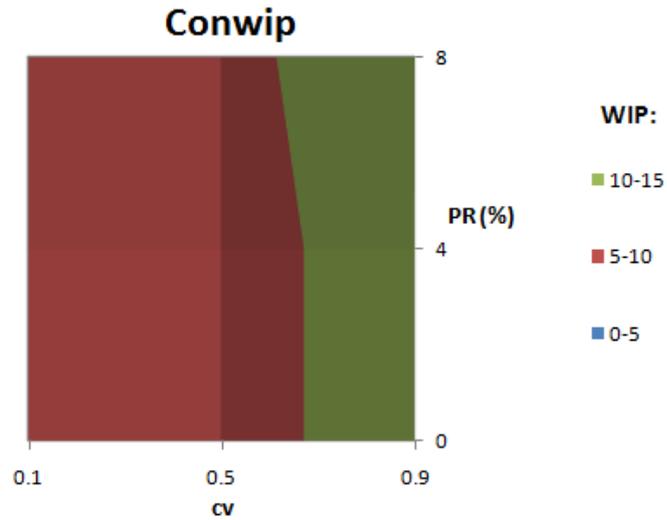


Gráfica 30. Contorno. Conwip; TH=80%; Disp.=100% (I)

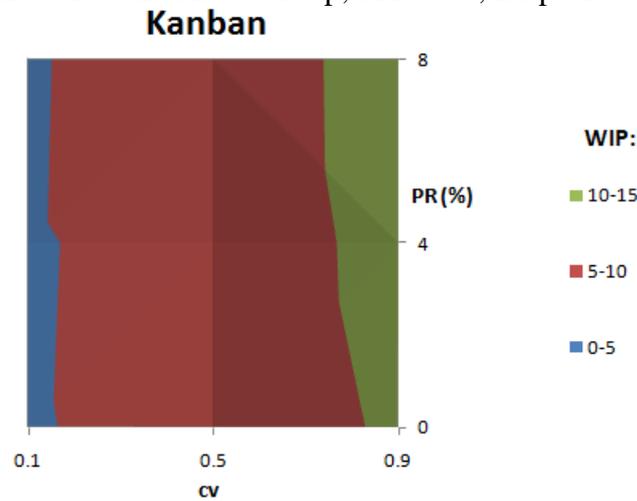


Gráfica 31. Contorno. Kanban; TH=80%; Disp.=100% (I)

Para comparar más fácilmente los sistemas Kanban y Conwip dentro de los distintos escenarios hay que variar la escala de las gráficas.

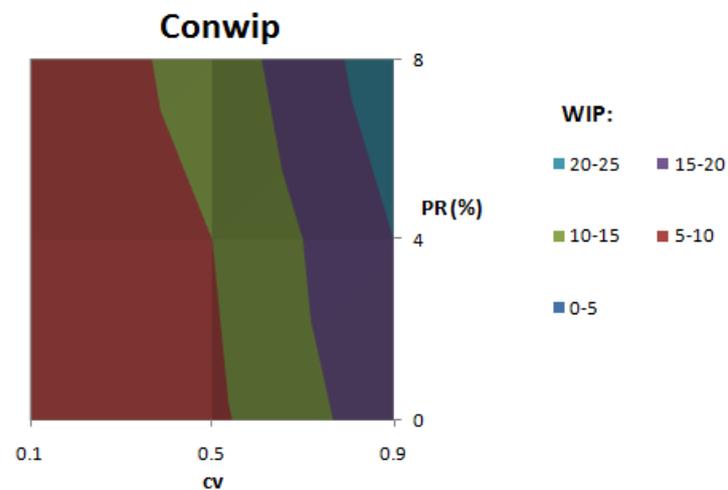


Gráfica 32. Contorno. Conwip; TH=80%; Disp.=100% (II)

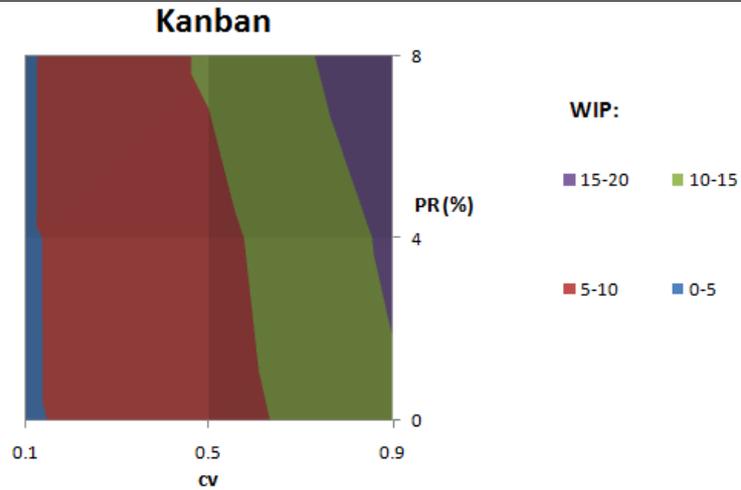


Gráfica 33. Contorno. Kanban; TH=80%; Disp.=100% (II)

- Disponibilidad=90% TipoA

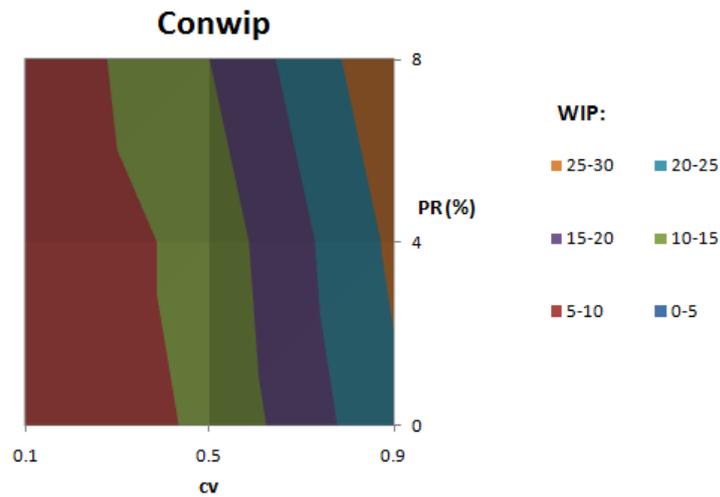


Gráfica 34. Contorno. Conwip; TH=80%; Disp.=90% TipoA

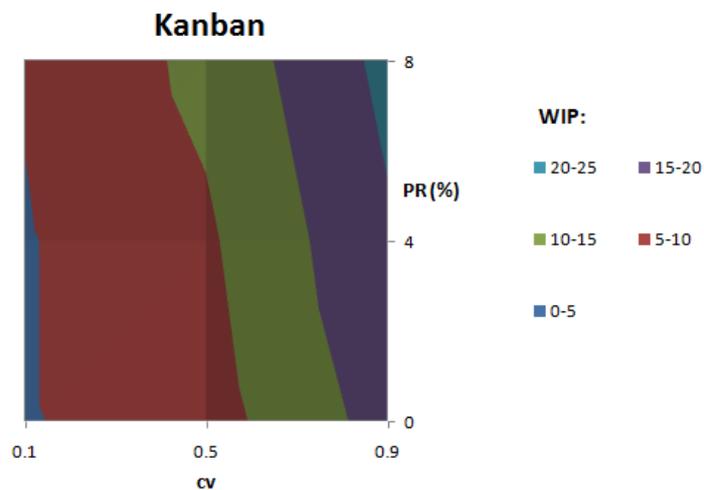


Gráfica 35. Contorno. Kanban; TH=80%; Disp.=90% TipoA

- Disponibilidad=90% TipoB



Gráfica 36. Contorno. Conwip; TH=80%; Disp.=90% TipoB



Gráfica 37. Contorno. Kanban; TH=80%; Disp.=90% TipoB



Los resultados obtenidos para TH=80% son similares a los obtenidos para TH=70%. Para hacer más sencilla la comparación de los resultados para los diferentes TH, se va a cambiar la escala de las gráficas para TH=80% de manera que sean iguales a la de TH=70%.

Para visualizar con mayor claridad las diferencias obtenidas para los distintos TH en los experimentos, se presentan en las figuras 77, 78 y 79, para cada tipo de disponibilidad, las anteriores gráficas en escala de diferentes tonalidades del mismo color unas junto a otras.

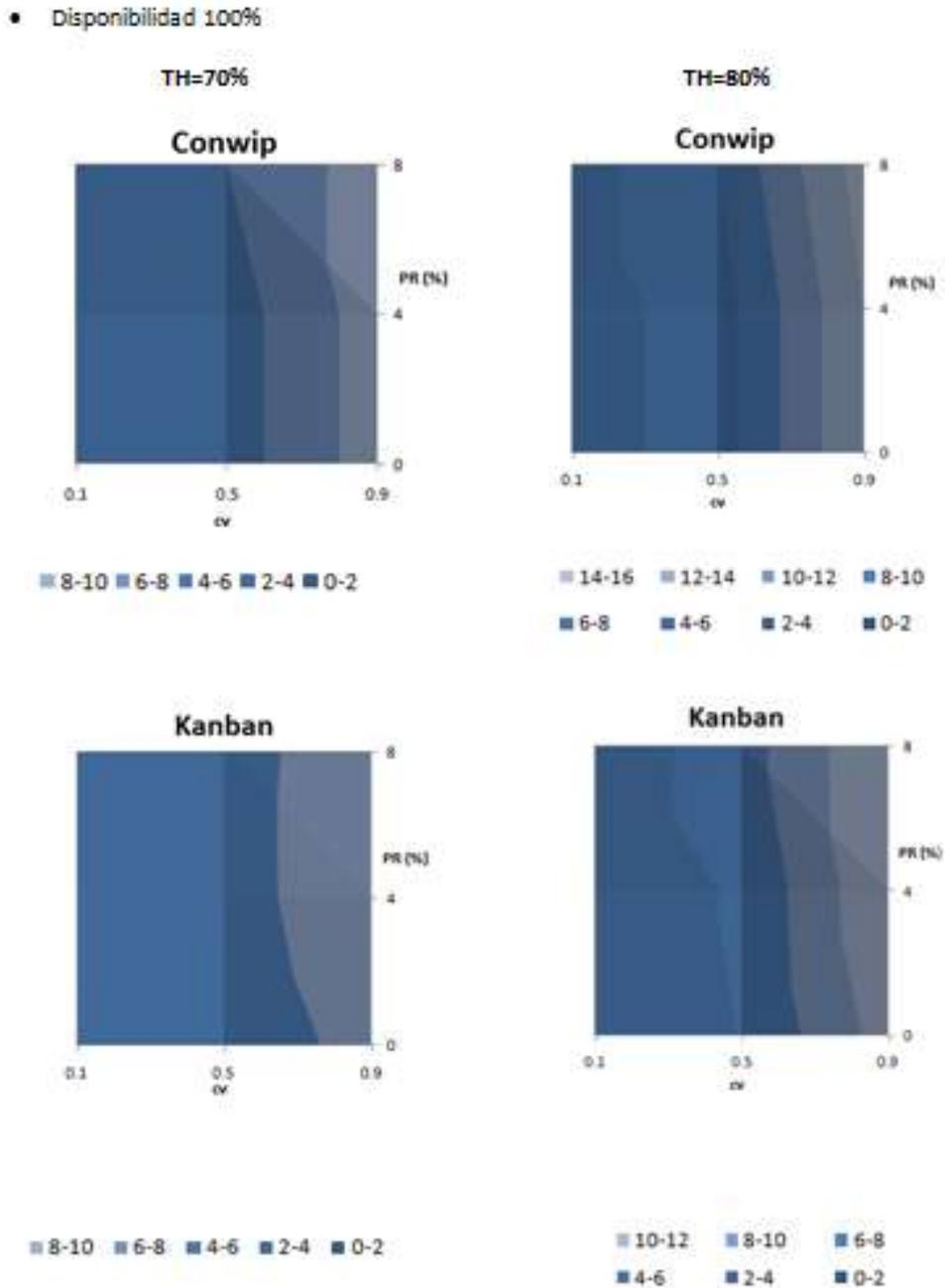


Figura 78. Comparación Gráficas de Contorno I



- Disponibilidad=90%, Tipo A

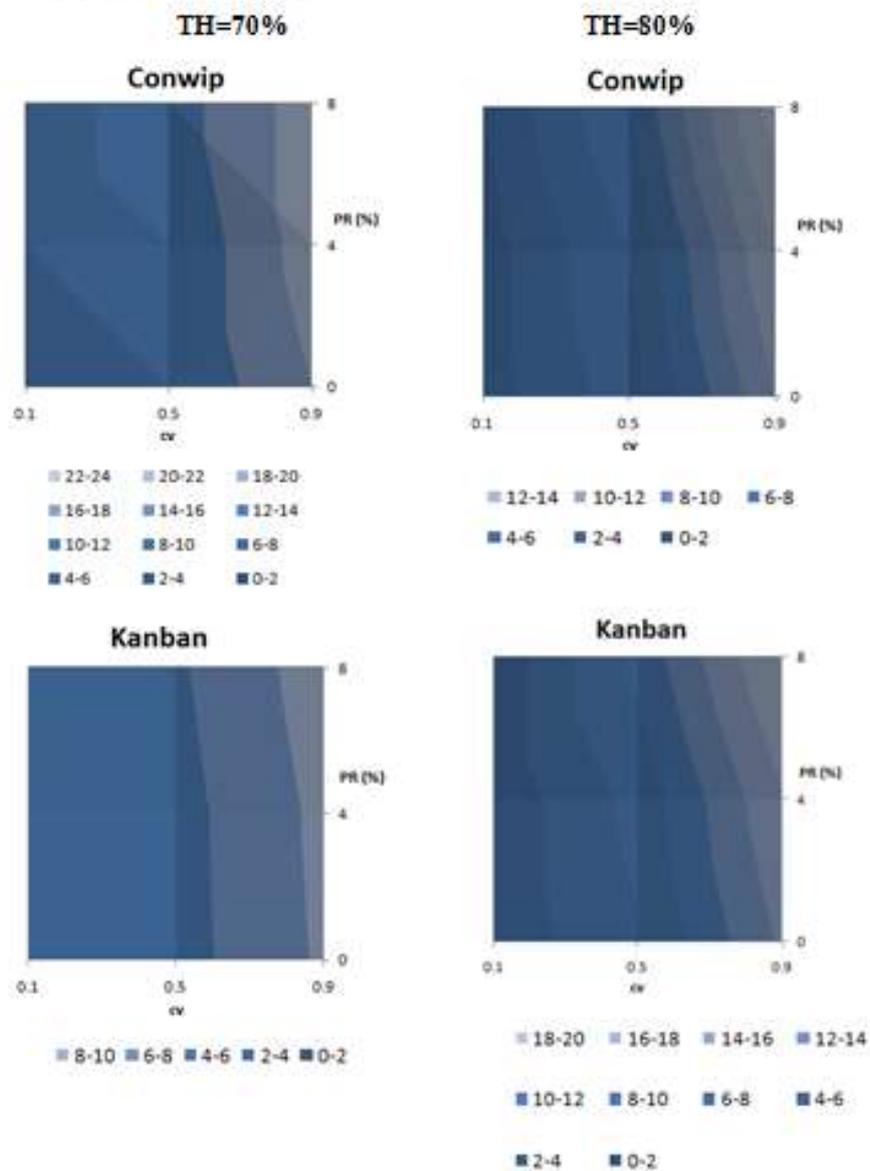


Figura 79. Comparación Gráficas de Contorno II



- Disponibilidad=90%, Tipo B

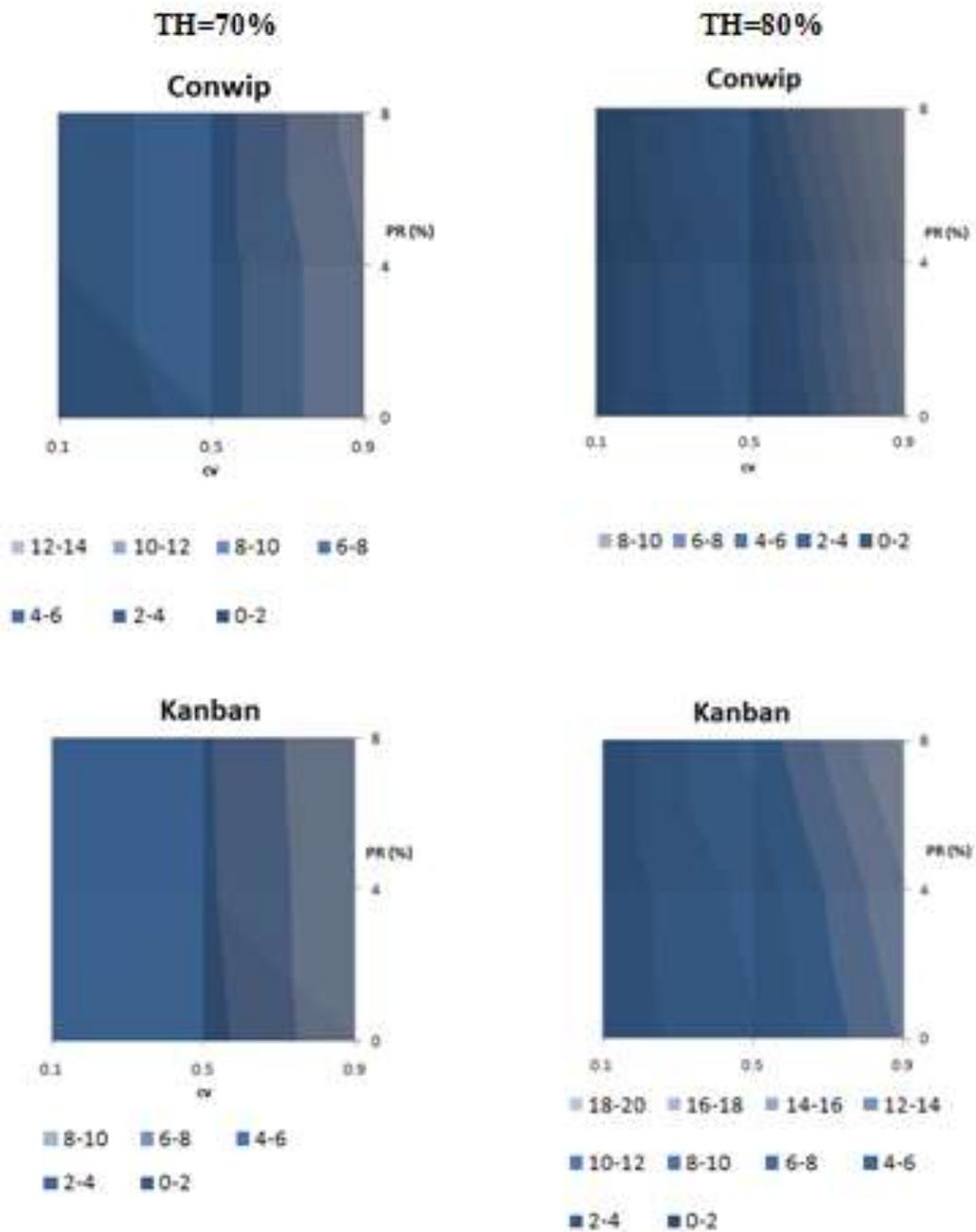


Figura 80. Comparación Gráficas de Contorno III

En las leyendas se observan que los colores más claros corresponden a valores mayores de la variable WIP.

De los resultados obtenidos de las gráficas se deduce que para $TH_{min}=80\%$, el WIP es mayor para ambos sistemas. Lo que supone un empeoramiento de ambos sistemas, más acusado en el caso del sistema Conwip.