

Aircraft Maintenance Scheduling with Multi- Objective Simulation- Optimization

Heikki Puustinen

7.5.2011

Ohjaaja: Ville Mattila

Valvoja: Raimo Hämäläinen

Tausta

- Ilmavoimilla tärkeä rooli maanpuolustuksessa
- Rauhan aikana
 - Ilmatilan valvonta
 - Ilmatilan loukkausten estäminen
- Sodan aikana
 - Hävittäjätorjunta
 - Kohteiden suojaus
 - Maakohteiden tuhoaminen
- FiAF: 62 kpl F-18C/D

Tehtävä (1/3)

- Hävittäjälentokoneiden huoltojen aikataulutus
 - Aikataulu = Huoltojen suunnitellut aloitusajat
 - Tavoitteet
 - Lentokoneiden käytettävyyden maksimointi
 - Huoltojen suunniteltujen ja toteutuneiden aloitusaikojen erojen minimointi
 - Tavoitteiden toteutuminen
 - Monimutkainen, epävarmuutta sisältävä kokonaisuus
 - Estimoitava simuloimalla
- => Monitavoitteinen simulointi-optimointitehtävä

Tehtävä (2/3)

$$\min_x [f_A(x), f_D(x)] = E[-Y_A(x, \omega), Y_D(x, \omega)]$$

s. t.

$$x_{i,j} \in I^+$$

$$x_{i,j} \leq x_{i,j+1}$$

$$l \leq x_{i,j} \leq u$$

$$i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, n_i$$

$$i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, n_i - 1$$

$$i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, n_i$$

x = Huoltosuunnitelma

$x_{i,j}$ = i . lentokoneen j . suunniteltu huolto

n_i = i . lentokoneelle suunniteltujen huoltojen lukumäärä

l = Huoltopäivämäärän alaraja

u = Huoltopäivämäärän yläraja

M = Lentokoneiden lukumäärä

Y_A = Lentokoneiden keskimääräinen käytettävyys

Y_D = Keskimääräinen ero toteutuneiden ja suunniteltujen huoltopäivien välillä

ω = Mallin stokastiikka

Tehtävä (3/3)

$$Y_A(x, \omega) = \frac{1}{MC} \sum_{t=1}^C \sum_{i=1}^M \phi(x, \omega, t)$$

$$Y_D(x, \omega) = \frac{\sum_{(i,j) \in V(x, \omega; C)} |x_{i,j} - \tau_{i,j}(x, \omega; C)|}{n(V(x, \omega; C))}$$

C = Suunnittelujakson pituus vuorokausissa

$\phi(x, \omega, t)$ = Indikaattorifunktio, joka antaa arvon 1 jos lentokone on käytettävissä, 0 jos se ei ole käytettävissä ajanhetkellä t

$V(x, \omega; C)$ = Niiden indeksien joukko, joita vastaavat huollot toteutuivat C :n aikana.

$n(V(x, \omega; C))$ = Toteutuneiden huoltojen lukumäärä C :n aikana

$\tau(x, \omega; C)$ = Toteutuneen huollon päivämäärä C :n aikana

Lähestymistapa

- Simulointimallin muodostaminen
- Ei-dominoidun ratkaisujoukon tuottaminen
- Preferoidun ratkaisun valinta em. joukosta

Simulointimalli

Optimointi

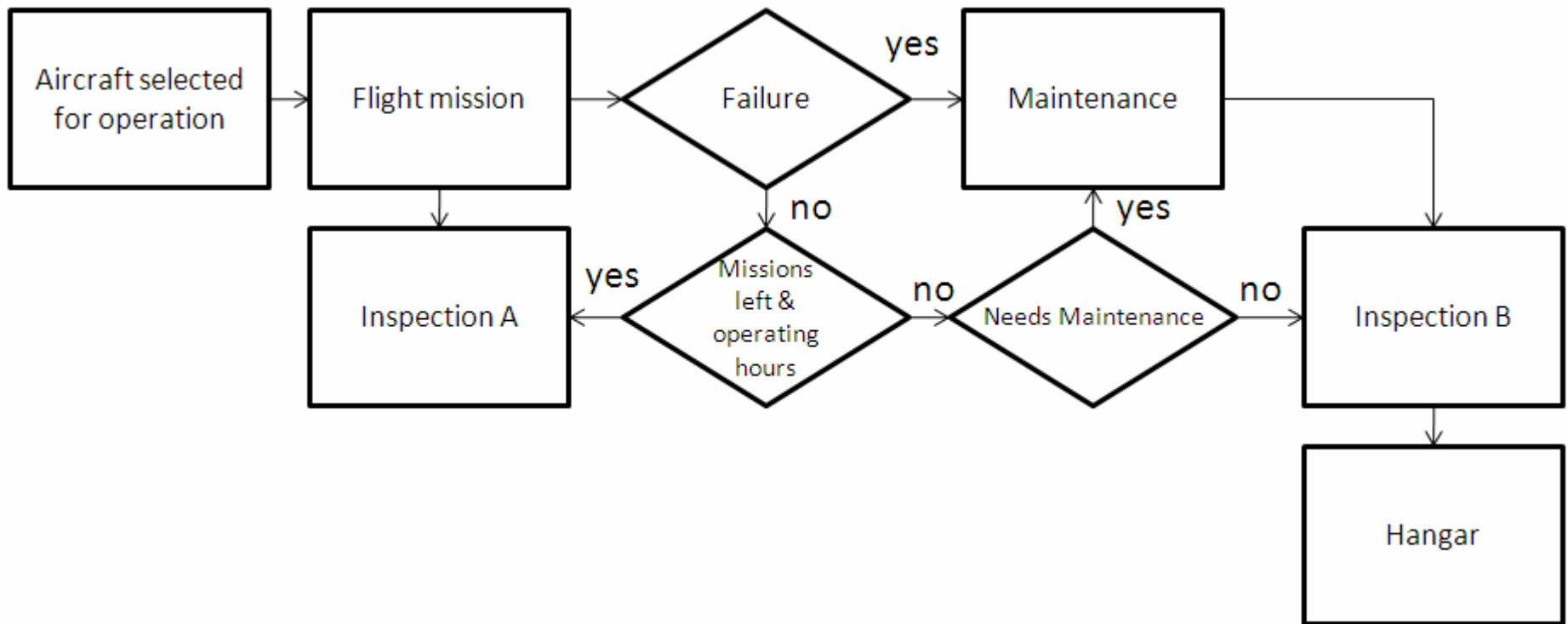
Päätösanalyysi

Simulointimalli (1/5)

- Mallinnetaan laivueen päivittäistä toimintaa
 - Käytettävien lentokoneiden valinta
 - Lentojen suorittaminen
 - Tarkastukset lentojen jälkeen
 - Vikojen havainnointi
 - Huoltotarpeiden toteaminen
 - Huoltoon lähetys ja huollosta vastaanottaminen

=> Tapahtumapohjainen simulointi

Simulointimalli (2/2)



Simulointimalli

Optimointi

Päätösanalyysi

Optimointialgoritmi (1/7)

- Simuloitu jäähdytys (Simulated Annealing)
- Sopii tehtäviin, joissa on iso ratkaisujoukko ja riittää löytää ”hyvä” ratkaisu
- Ideana etsiä uusi ratkaisu nykyisen ratkaisun lähiympäristöstä, sekä sallia ”ylärinteeseen” siirtymiset
- Välttää lokaalit optimit
- Ei välttämättä löydä globaalia optimia

Optimointialgoritmi (2/7)

Uuden ratkaisuehdokkaan muodostus

$$\hat{x}_{i,j} = \begin{cases} \text{Uni}(\max(l, x_{i,j} - \Delta), \min(x_{i,j} + \Delta, x_{i,j+1} - 1)), & \text{if } j = 1 \\ \text{Uni}(\max(x_{i,j-1} + 1, x_{i,j} - \Delta), \min(x_{i,j} + \Delta, x_{i,j} - 1)), & \text{if } j > 1 \text{ and } j < n_i \\ \text{Uni}(\max(x_{i,j-1} + 1, x_{i,j} - \Delta), \min(x_{i,j} + \Delta, u)), & \text{if } j = n_i \end{cases}$$

Δ = suurin sallittu muutos nykyisestä päivämäärästä

(l,u) = huoltopäivämäärän ala- ja yläraja

Optimointialgoritmi (3/7)

Määritellään dominaatio

Jos kohdefunktioiden arvot ei-dominoidulle ratkaisulle x ovat $\widehat{f}_A(x)$ ja $\widehat{f}_D(x)$, niin $\nexists \tilde{x}$ s.e. $\widehat{f}_A(\tilde{x}) \leq \widehat{f}_A(x)$ ja $\widehat{f}_D(\tilde{x}) \leq \widehat{f}_D(x)$, missä vähintään yksi epäyhtälö on $<$.

Optimointialgoritmi (4/7)

Määritellään $\hat{f}_A(x)$:n estimaatti normaalijakautuneena satunnaismuuttujana keskiarvolla

$$\bar{f}_A(x) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \hat{f}_A(x, \omega_i)$$

ja varianssilla

$$\sigma_A(x) = \frac{s_A^2(x)}{M} = \frac{\sum_{i=1}^L \hat{f}_A(x, \omega_i) - \bar{f}_A(x)}{M(L-1)}$$

ω_i = toteutunut stokastiikka

L = simulaatioajojen lkm

Optimointialgoritmi (5/7)

Todennäköisyys, jolla ratkaisu x dominoi y :tä käytettävyyden tapauksessa

$$P(\hat{f}_A(x) > \hat{f}_A(y))$$

lasketaan normaalijakauman kertymäfunktioista

$$N(\bar{f}_A(x) - \bar{f}_A(y), \frac{s_A^2(x)}{M} + \frac{s_A^2(y)}{M})$$

Kun tehdään samoin huoltopäiville, saadaan todennäköisyys tapahtumalle ratkaisut x dominoi y :tä

$$P(x < y) = P(\hat{f}_A(x) < \hat{f}_A(y)) P(\hat{f}_D(x) < \hat{f}_D(y))$$

Optimointialgoritmi (6/7)

Nyt voidaan antaa tämän hetkiselle ja uudelle ratkaisuille \tilde{x} ja \hat{x} tehokkuusarvot

$$P_{\tilde{x}} = \sum_{x \in S \setminus \{\tilde{x}\} \cup \{\hat{x}\}} P(x < \tilde{x})$$

ja

$$P_{\hat{x}} = \sum_{x \in S \cup \{\tilde{x}\}} P(x < \hat{x})$$

S = ei-dominoitu ratkaisujoukko

Optimointialgoritmi (7/7)

Nyt uusi ratkaisu hyväksytään todennäköisyydellä

$$p = e^{-\frac{P_{\hat{x}} - P_{\tilde{x}}}{T}}$$

T = Algoritmin lämpötila, joka määrää miten helposti uusi ratkaisu hyväksytään.

Ei-dominoitua joukkoa päivitetään samalla idealla

Simulointimalli

Optimointi

Päätösanalyysi

Ratkaisun valinta (1/3)

- Kun ei-dominoitu ratkaisujoukko on laskettu, päätöksentekijän on valittava toteutettava ratkaisu
- Monitavoitteinen arvoteoria (MAVT)
 - Additiivinen arvofunktio
 - Intervallit yksiattribuuttisille arvoille simuloinnin tuottamien kohdefunktioiden arvojen luottamusväleistä
 - Intervallit attribuuttien painoille päätöksentekijältä
 - Dominanssien lasku, päätössäännöt

Ratkaisun valinta (2/3)

Additiivinen arvofunktiio

$$V(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n w_i v_i(x_i)$$

Kohdefunktion ala- ja ylärajat

$$x_A^0 = \min_{x \in S} \hat{f}_A(x) - t_{\frac{\alpha}{2}, L} \hat{\sigma}(\hat{f}_A(x))$$

$$x_A^* = \max_{x \in S} \hat{f}_A(x) + t_{\frac{\alpha}{2}, L} \hat{\sigma}(\hat{f}_A(x))$$

Skaalataan arvofunktiio välille [0, 1]

$$v_A(x_A) = \frac{x_A - x_A^0}{x_A^* - x_A^0}$$

Ratkaisun valinta (3/3)

Kohdefunktioiden arvointervallit

$$\begin{aligned} [\underline{v}_A(x), \bar{v}_A(x)] &= \left[v_A \left(\hat{f}_A(x) - t_{\frac{\alpha}{2}, L} \hat{\sigma}(\hat{f}_A(x)) \right), v_A \left(\hat{f}_A(x) + t_{\frac{\alpha}{2}, L} \hat{\sigma}(\hat{f}_A(x)) \right) \right] \\ [\underline{v}_D(x), \bar{v}_D(x)] &= \left[v_D \left(\hat{f}_D(x) - t_{\frac{\alpha}{2}, L} \hat{\sigma}(\hat{f}_D(x)) \right), v_D \left(\hat{f}_D(x) + t_{\frac{\alpha}{2}, L} \hat{\sigma}(\hat{f}_D(x)) \right) \right] \end{aligned}$$

Kohdefunktioiden painointervallit $[\underline{w}_i, \bar{w}_i]$
päättösentekijältä

Lopullinen arvointervalli

$$\begin{aligned} \underline{V} &= \min_{w_A \in [\underline{w}_A, \bar{w}_A], w_D \in [\underline{w}_D, \bar{w}_D], w_A + w_D = 1} w_A \underline{v}_A(x) + w_D \underline{v}_D(x) \\ \bar{V} &= \max_{w_A \in [\underline{w}_A, \bar{w}_A], w_D \in [\underline{w}_D, \bar{w}_D], w_A + w_D = 1} w_A \bar{v}_A(x) + w_D \bar{v}_D(x) \end{aligned}$$

Esimerkkitehtävä (1/8)

- 16 lentokonetta
- 4 konetta päivittäisessä toiminnassa
- 4 lentoa/kone, $t_L \sim \text{norm}(45\text{min}, 15\text{min})$
- Vikaantumisväli, $t_F \sim \text{exp}(12\text{h})$
- 6 eri tyyppistä huoltoa
- Suunnittelu-aika 260 vrk
- 2000 itetaariota, 50 replikaatiota/iteraatio
- $S = 20$
- $\Delta = 20$

Esimerkkitehtävä (1/7)

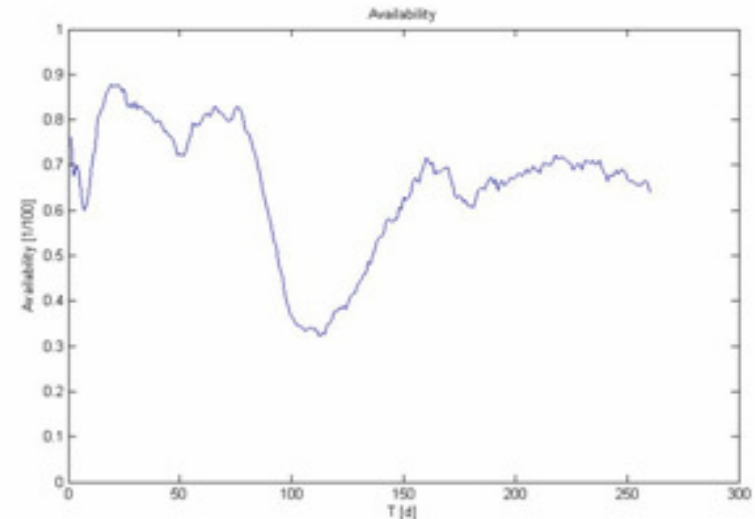
- Eri huoltotyyppisiä ja huoltolaitoksia
- Huoltovälit

Maintenance type	Interval (flight hours)	Tolerance (hours)	Facility	Maintenance time (hours)
type I	50	± 5	1	tria(3.88,10,16.12)
type II	125	± 20	2	50 + gamm(12.5,2)
type III	250	± 20	2	125 + gamm(31.25,2)
type IV	500	± 20	3	260 + gamm(60,2)
type V	1000	± 20	3	300 + gama(60,2)
type VI	2000	± 20	3	333,33 + gamm(83.33,2)

Esimerkkitehtävä (2/7)

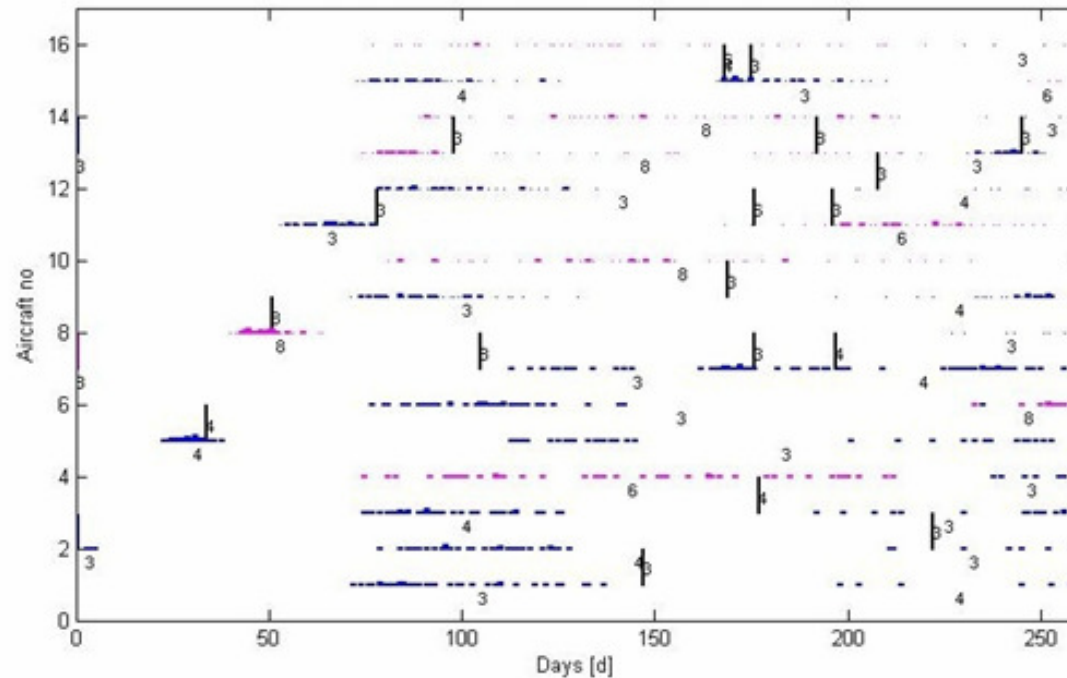
Alkutilanne

- Satunnainen aikataulu
- Keskimääräinen käytettävyys: 65,8 %
- Keskimääräinen huoltopäivän poikkeama suunnitellusta: 80,6 d



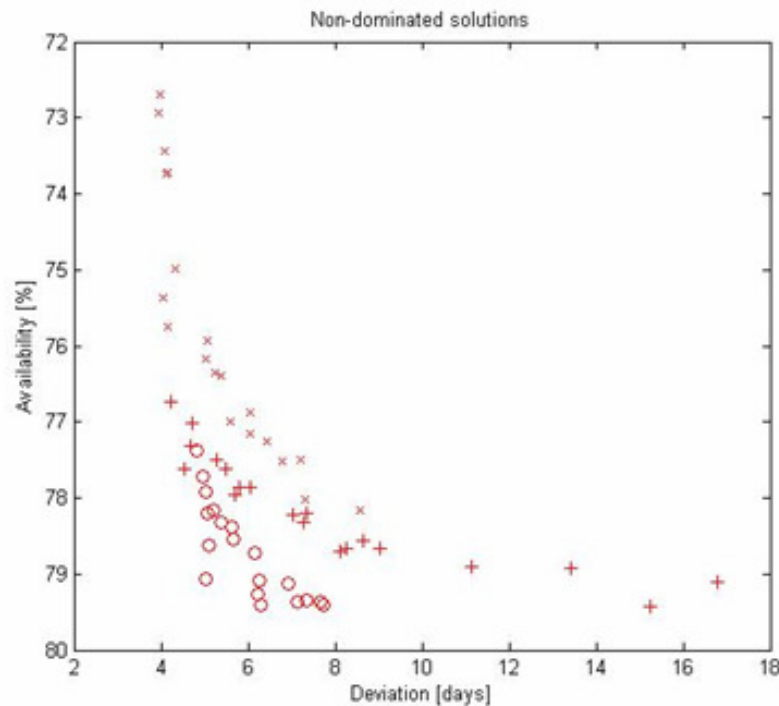
Esimerkkitehtävä (3/7)

Toteutuneet huollot 50 simulaatiossa



Esimerkkitehtävä (4/7)

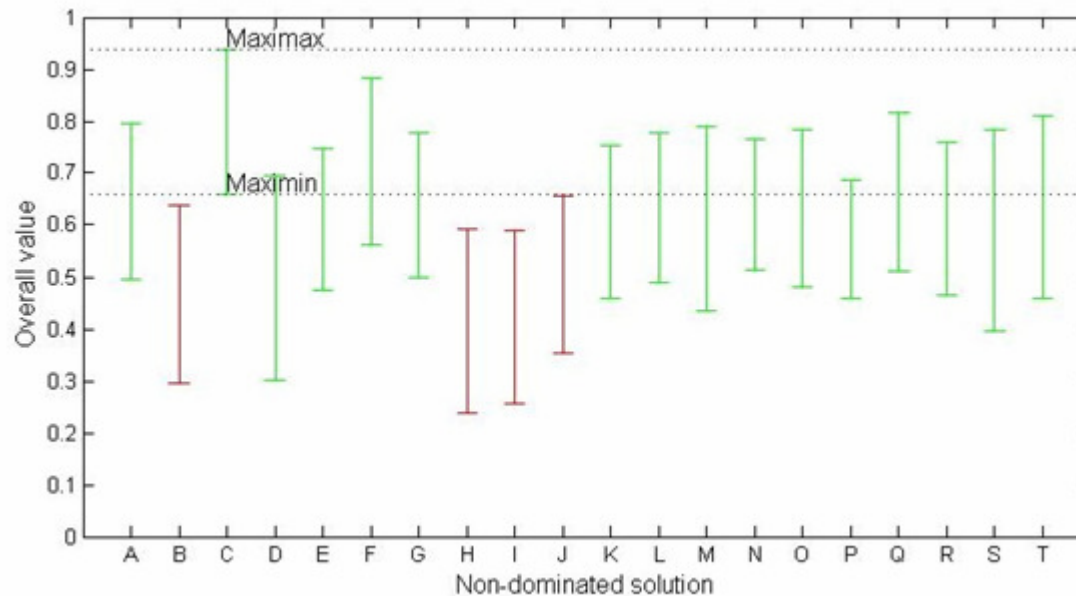
Ei-dominoitu joukko, kolme optimointiajoa



Esimerkkitehtävä (5/7)

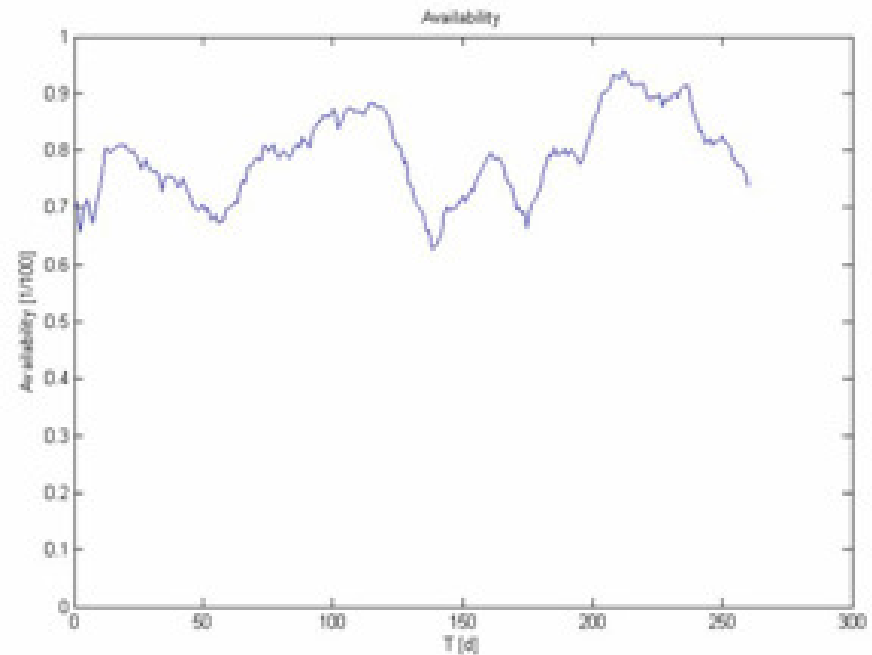
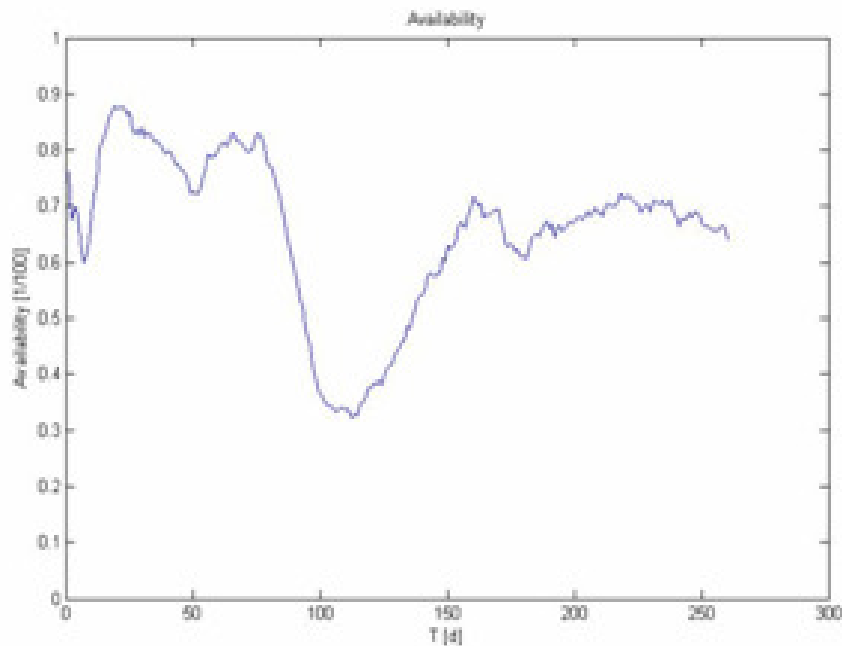
Preferoidun ei-dominoidun ratkaisun valinta

- Esim. maxmin tai maxmax => C



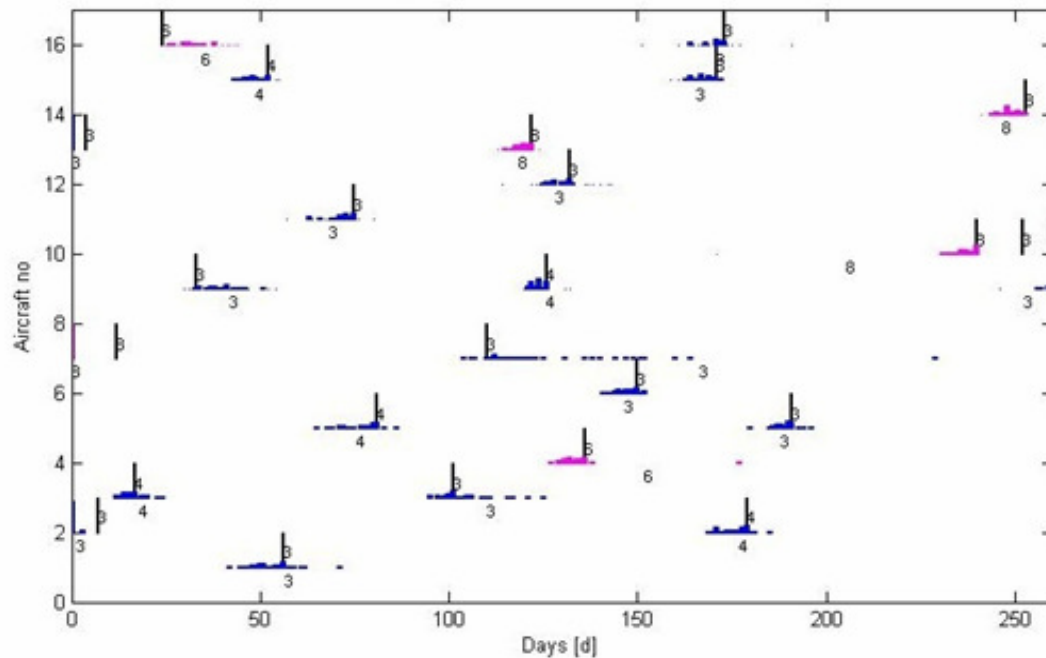
Esimerkkitehtävä (6/7)

Keskimääräinen käytettävyys 79,1 %

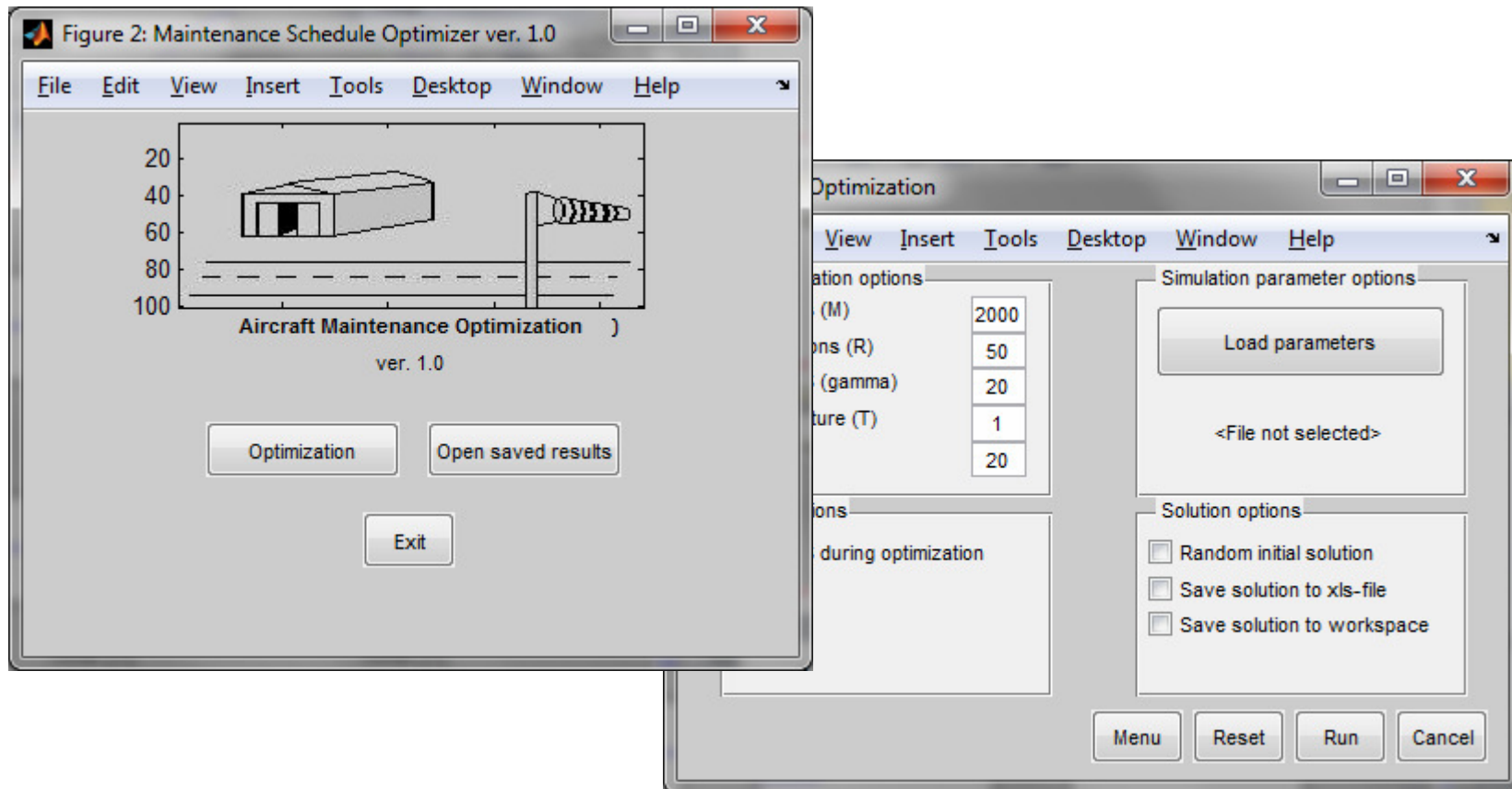


Esimerkkitehtävä (7/7)

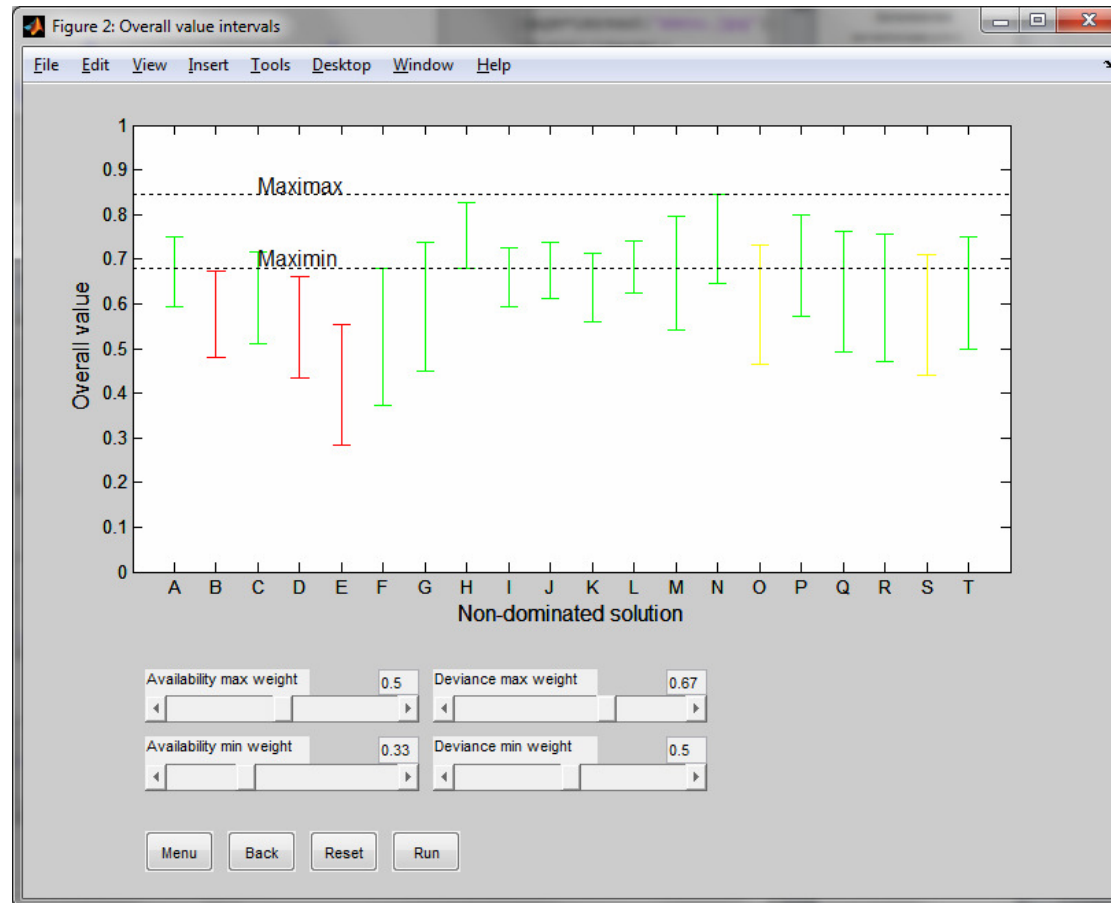
Keskimääräinen huoltopäivän poikkeama suunnitellusta 5,0 d



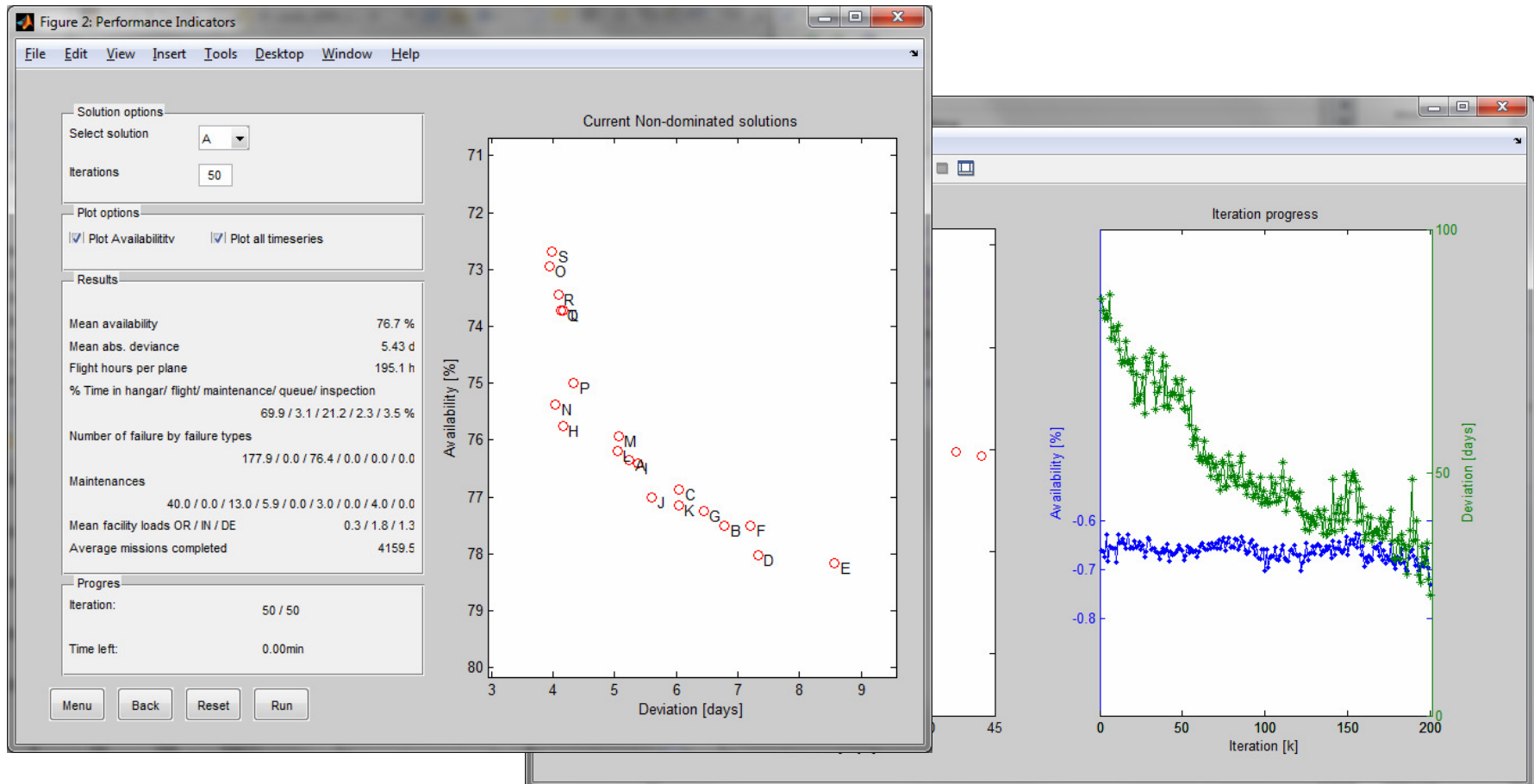
Optimointityökalu (1/4)



Optimointityökalu (2/4)



Optimointityökalu (3/4)



Optimointityökalu (4/4)

