
Métodos de Busca Heurística

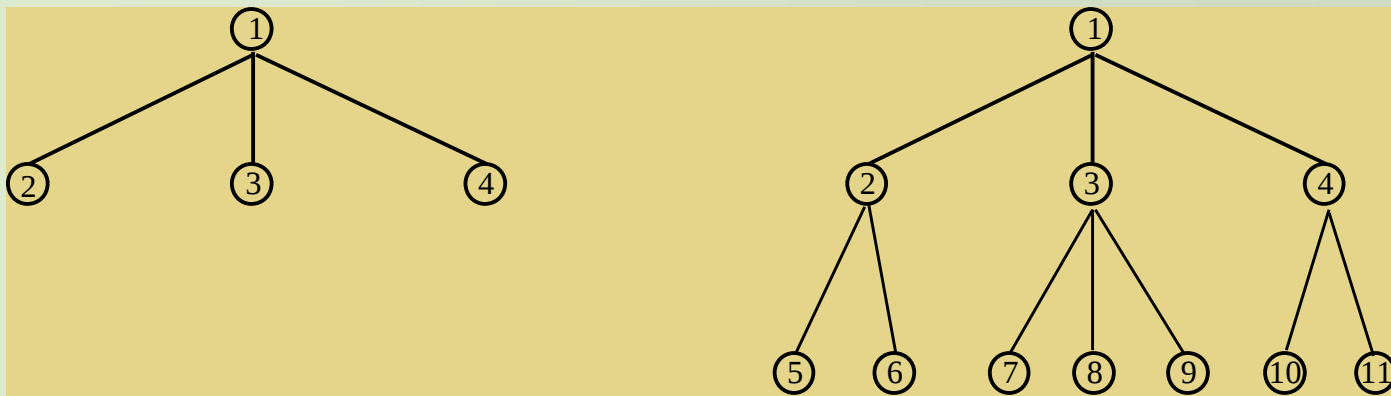
- Estratégias e técnicas de busca
- Exemplos ilustrativos e de aplicação
- Utilização do software OTIMIZA

Técnicas de Busca Heurística

- Um problema de busca pode ser visto como um processo de se determinar um percurso, através de uma estrutura em forma de árvore, para se alcançar um estado meta a partir de um estado inicial.
- Uma árvore de busca é um grafo orientado, constituída por nós e arcos, na qual cada nó representa um estado do problema, e cada arco representa como se relacionam os estados referentes aos nós por ele interligados

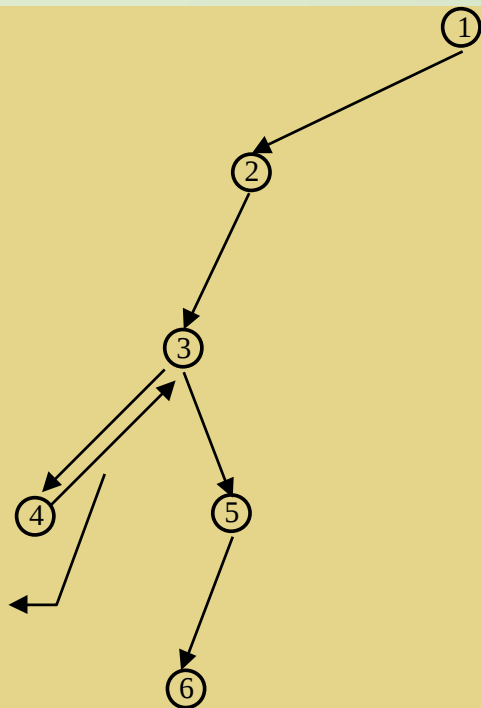
Técnicas de Busca Heurística

- busca em amplitude (*breadth-first search*): a partir do nó raiz, são gerados todos os seus nós sucessores, pela utilização de todas as regras ou operadores possíveis. Este processo se repete para todos os nós sucessores, até que a aplicação de alguma regra ou operador resulte num estado que corresponda à meta do problema



Técnicas de Busca Heurística

- busca em profundidade (*depth-first search*): a partir do nó raiz, em cada nível é gerado um único nó sucessor. A árvore é percorrida por um único caminho, até que a solução do problema seja alcançada ou que o caminho seja interrompido. Um caminho é interrompido quando se alcança um nó terminal (nó que não é a solução e que não possui sucessores), quando um nó representa um retorno a um estado anterior, ou quando se alcança um estado considerado "pior" (p. ex. mais longo, de maior custo). Em qualquer destes casos, um procedimento de retrocesso (*backtrack*) é realizado

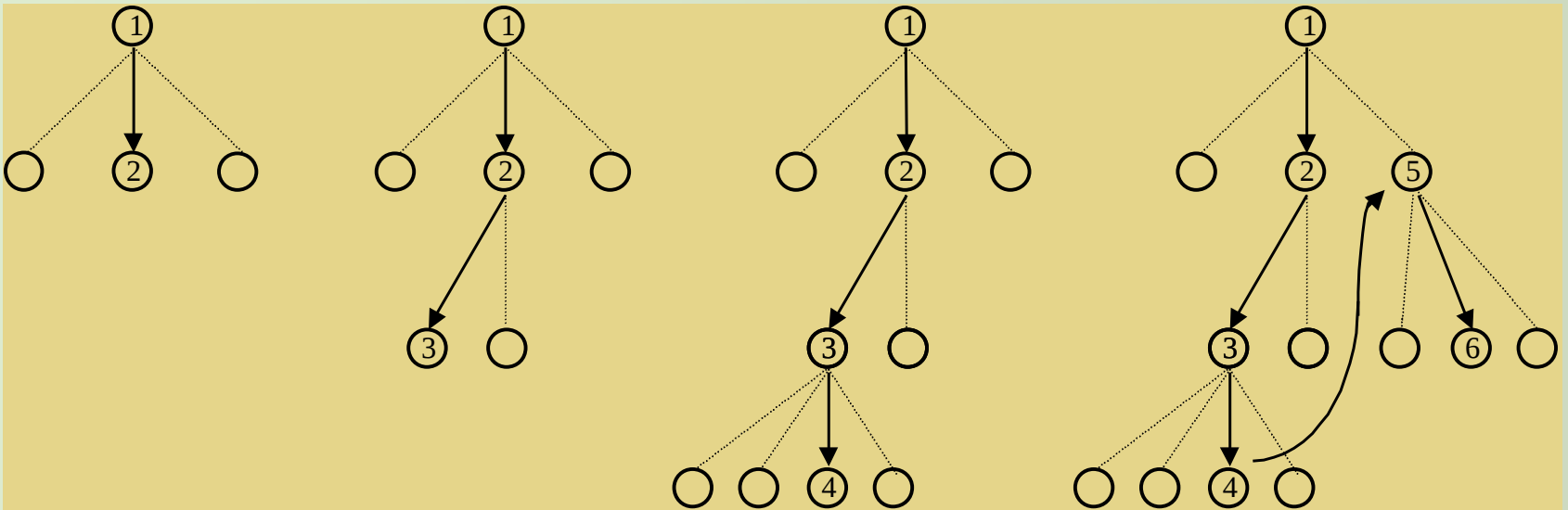


Técnicas de Busca Heurística

- gerar e testar (*generate-and-test*): variante da técnica de busca em profundidade, em que se procura avançar por um caminho na árvore de busca, e ao final se verifica se o estado alcançado representa uma solução para o problema.
- escalada da montanha (*hill climbing*): variante da técnica de busca em profundidade, que utiliza uma função heurística para direcionar o processo de busca. A partir do nó inicial gera-se um sucessor pela aplicação de um operador. Se o nó sucessor representar um estado melhor que o estado corrente, avança-se por este caminho; caso contrário, aplica-se outro operador em busca de um nó mais promissor.
- gradiente (*gradient search*): variante de *hill climbing*. Em cada nível da árvore de busca, todos os possíveis nós sucessores são avaliados, e o melhor deles é escolhido para ser expandido, desde que represente um estado que seja melhor que o estado corrente.

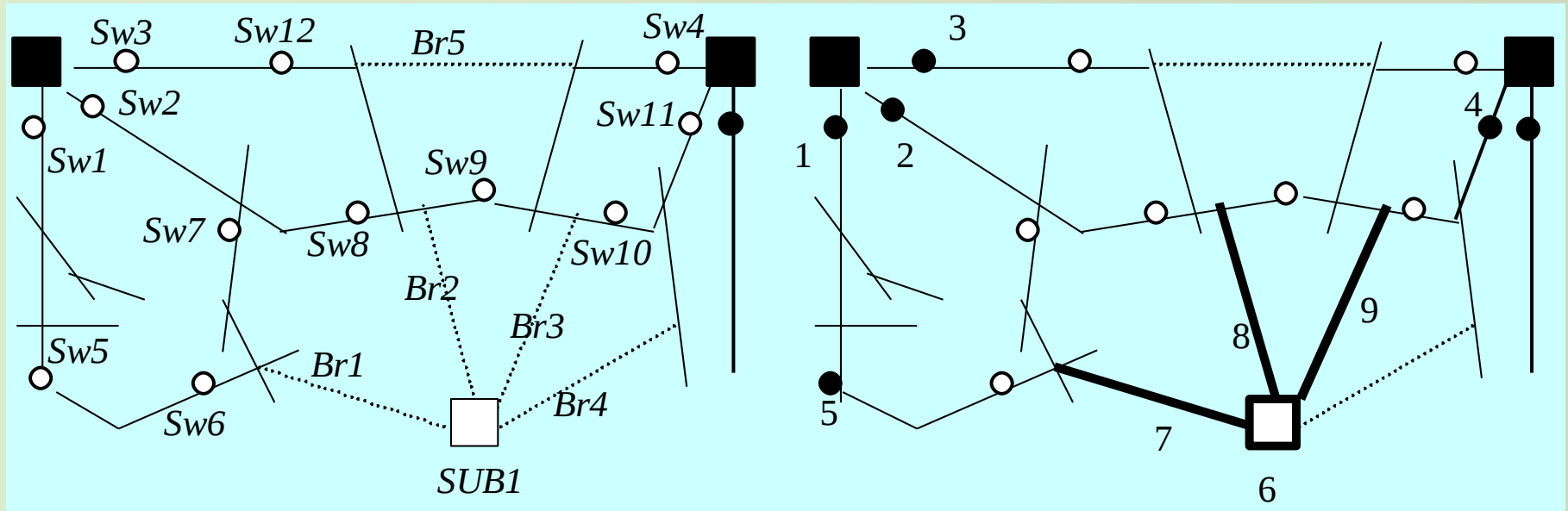
Técnicas de Busca Heurística

- busca pela melhor escolha (*best-first search*): combina as vantagens dos processos de busca em profundidade e em amplitude. Em cada passo são avaliados todos os nós possíveis de serem expandidos, pela aplicação de uma função heurística de avaliação específica para o problema. A busca é então continuada a partir do nó, dentre todos aqueles gerados até então, que se apresente como o mais promissor, ou seja, aquele que apresenta o maior potencial em direção à solução do problema.



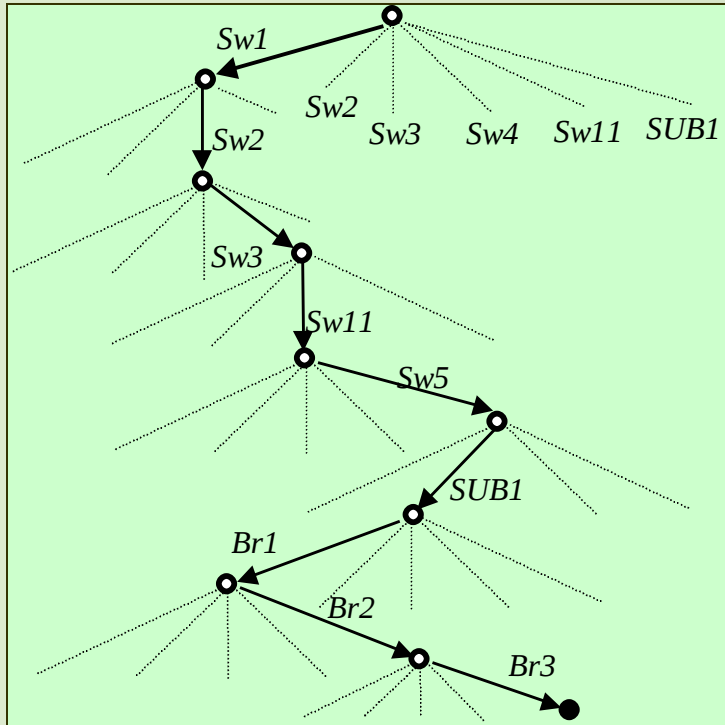
Estratégias Heurísticas

Estratégia construtiva

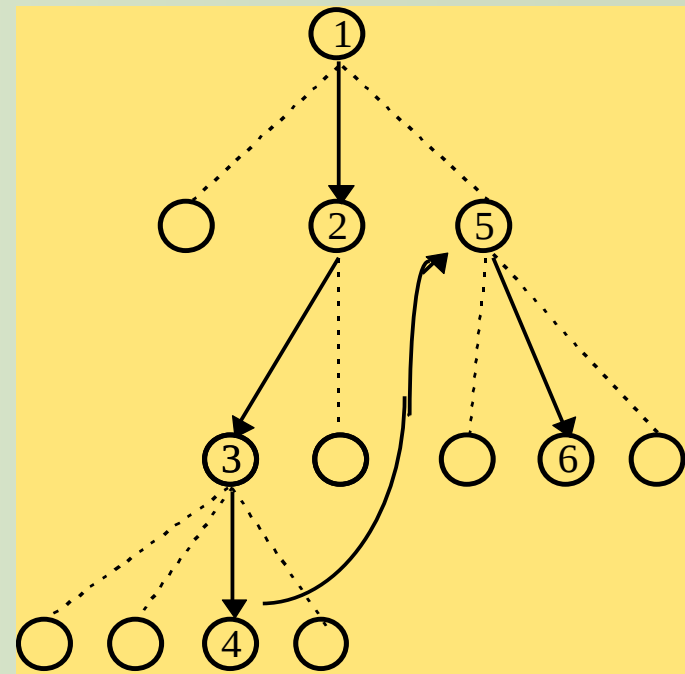


Procedimentos de Busca

Profundidade

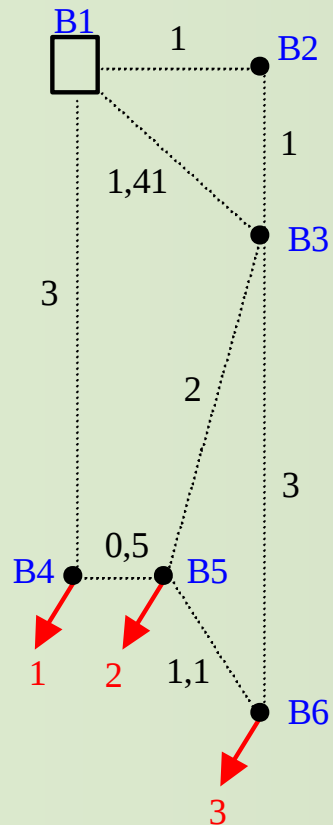


Melhor Escolha



Exemplo

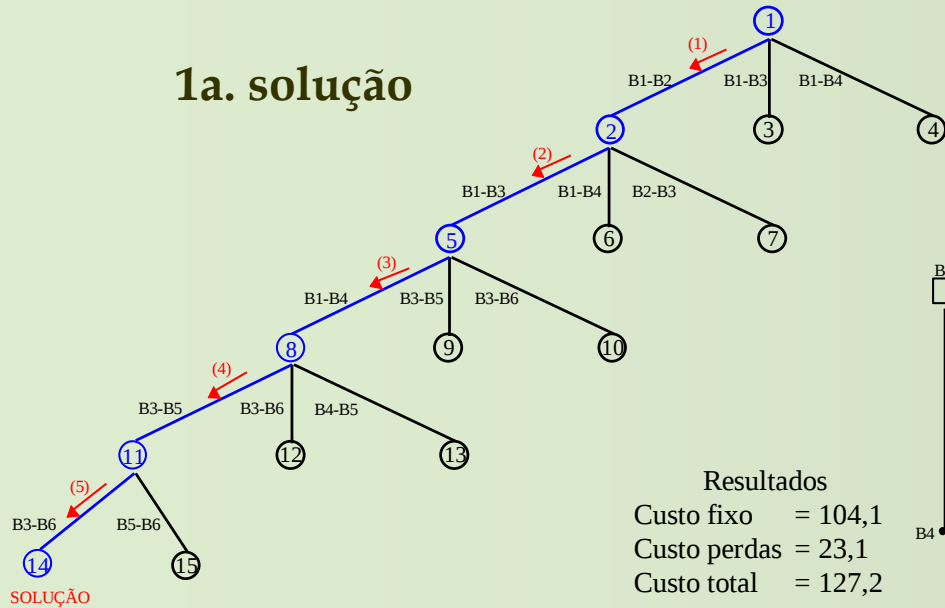
Objetivo: Minimização dos custos (investimentos e perdas)



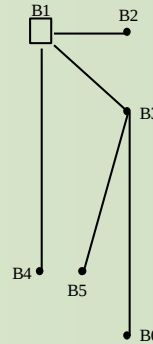
Legenda	
	subestação
	barra de carga
1 	trecho de 1 km
 3	carga de 3 A

Resultados: busca em profundidade simples

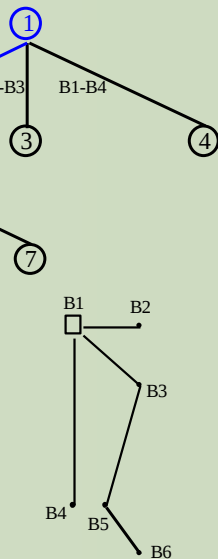
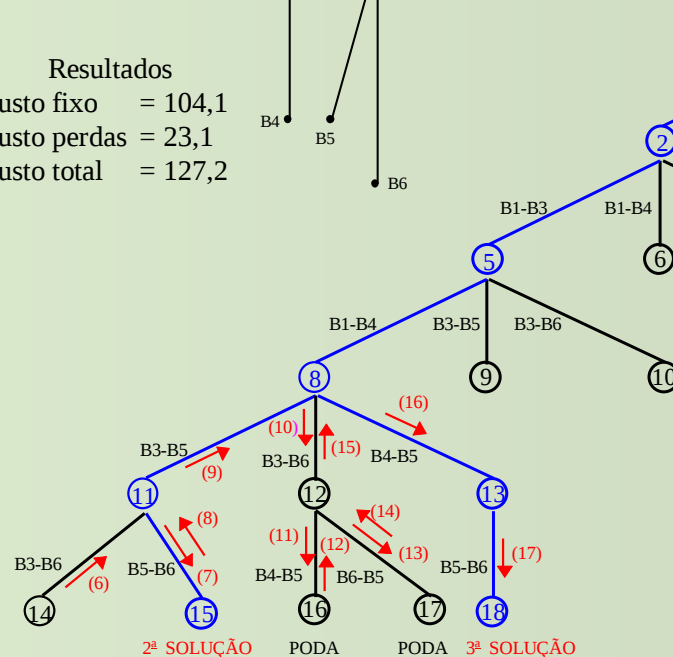
1a. solução



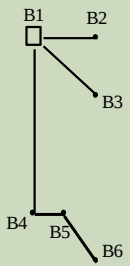
Resultados
 Custo fixo = 104,1
 Custo perdas = 23,1
 Custo total = 127,2



Próximas soluções



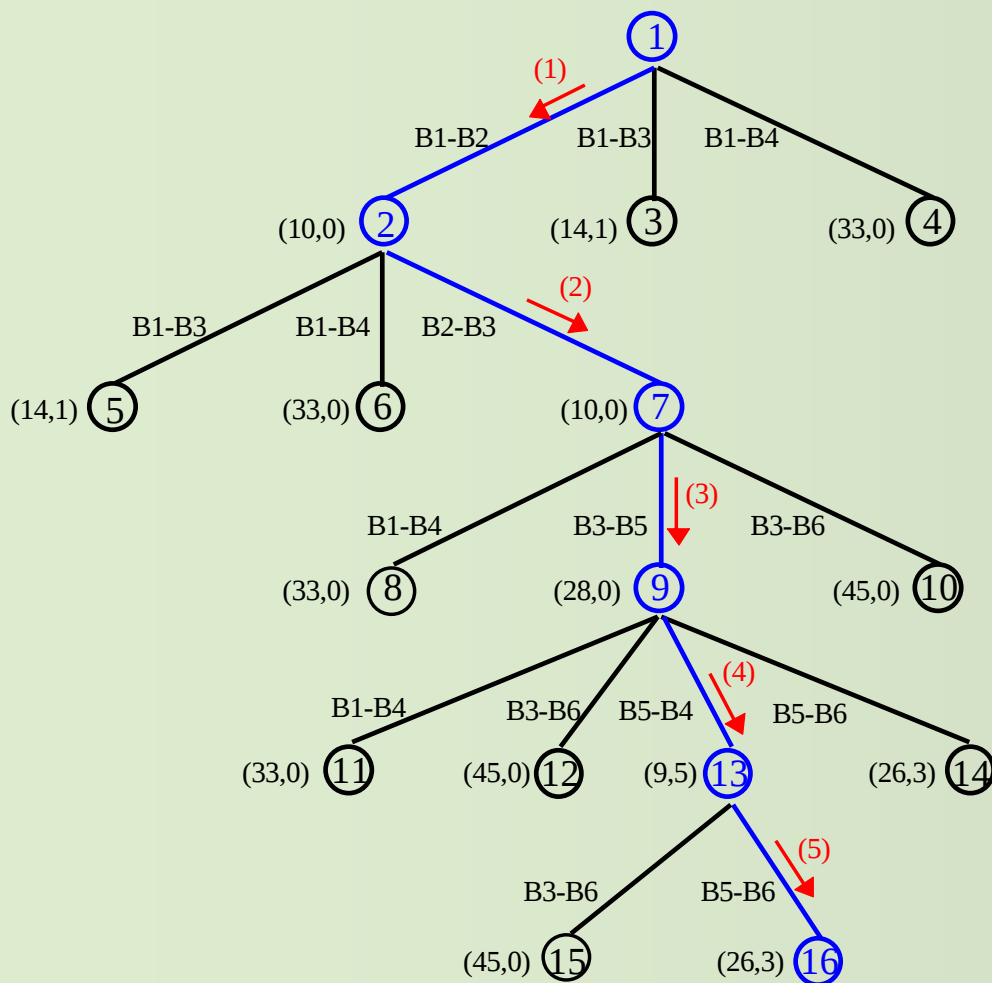
2ª SOLUÇÃO
 Custo fixo = 85,1
 Custo perdas = 23,4
 Custo total = 108,5



3ª SOLUÇÃO
 Custo fixo = 70,1
 Custo perdas = 23,8
 Custo total = 93,9

Resultados: busca em profundidade com estrutura de preferências

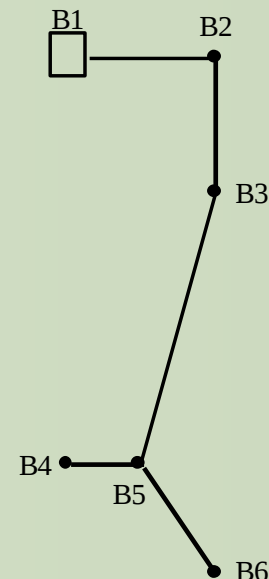
Primeira solução



SOLUÇÃO

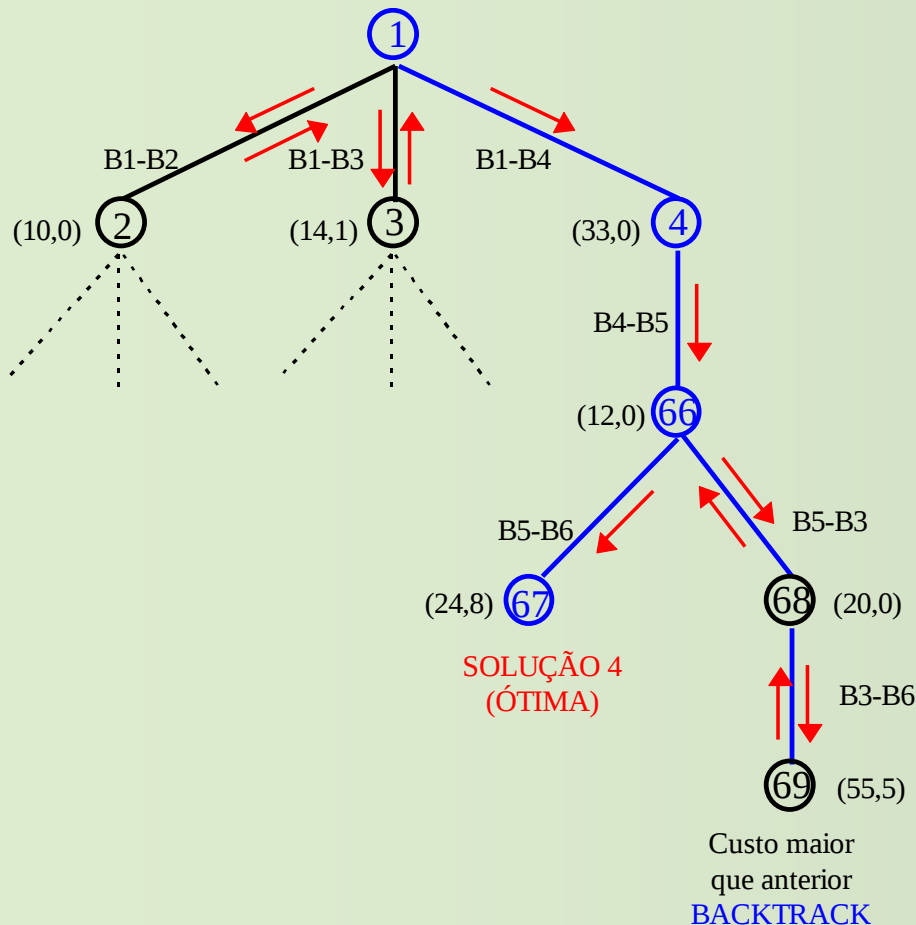
Resultados

Custo fixo = 56
Custo perdas = 27,8
Custo total = 83,8



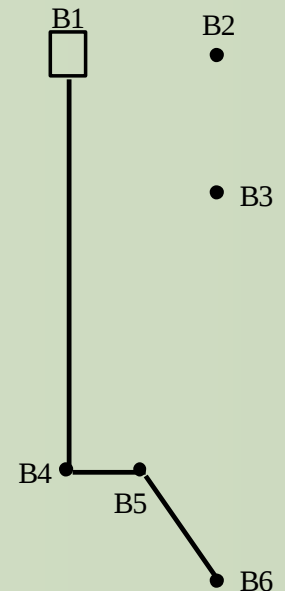
Resultados: busca em profundidade com estrutura de preferências

Solução ótima

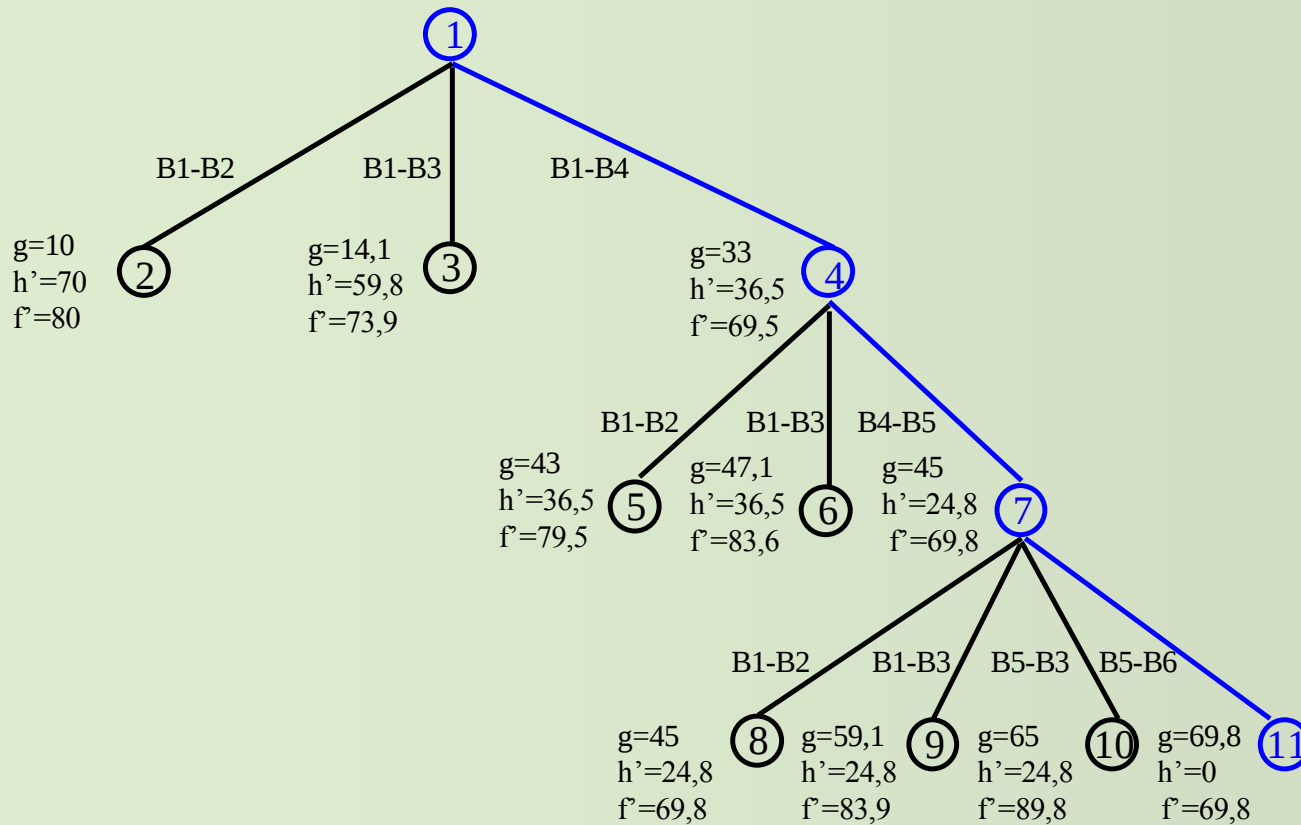


Resultados

Custo fixo = 46
Custo perdas = 23,8
Custo total = 69,8



Resultados: busca pela melhor escolha



SOLUÇÃO



Resultados

Custo fixo = 46
 Custo perdas = 23,8
 Custo total = 69,8

Análise dos resultados

- Busca em profundidade com função de avaliação:
 - ✓ para a primeira solução foram analisados 15 nós e expandidos 5. O custo é 34 % menor que o da primeira solução com busca em profundidade simples.
 - ✓ a solução ótima foi a 4a. encontrada, e foram avaliados 68 nós da árvore de busca.
- Busca pela melhor escolha:
 - ✓ foram analisados 11 nós e expandidos somente 3

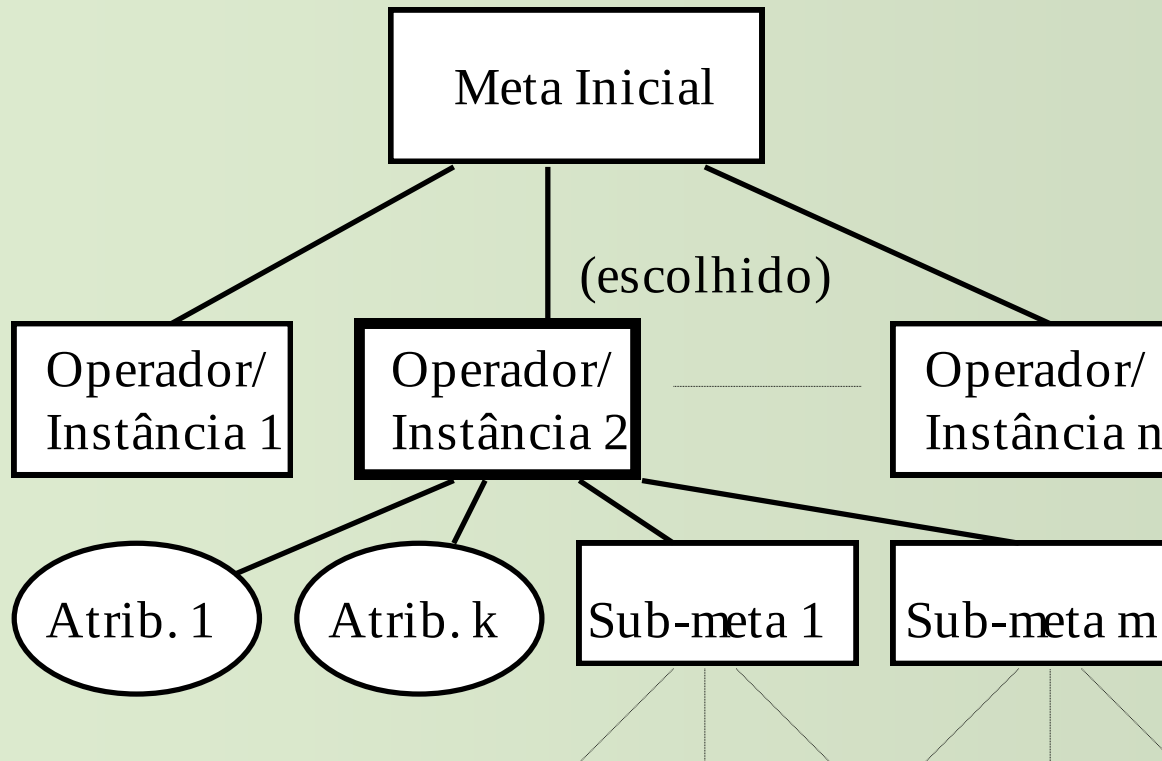
Técnica de busca - melhor escolha

- $f'(n) = g(n) + h'(n)$ (A* algorithm)
 - $g(n)$: custo para atingir o nó n , a partir do nó inicial;
 - $h(n)$: estimativa de custo para alcançár o nó meta.

Se h' sempre subestima h (o valor exato para alcançar o nó meta), então o algoritmo leva à solução ótima.

Problemas de Decisão com Restrições (CDP)

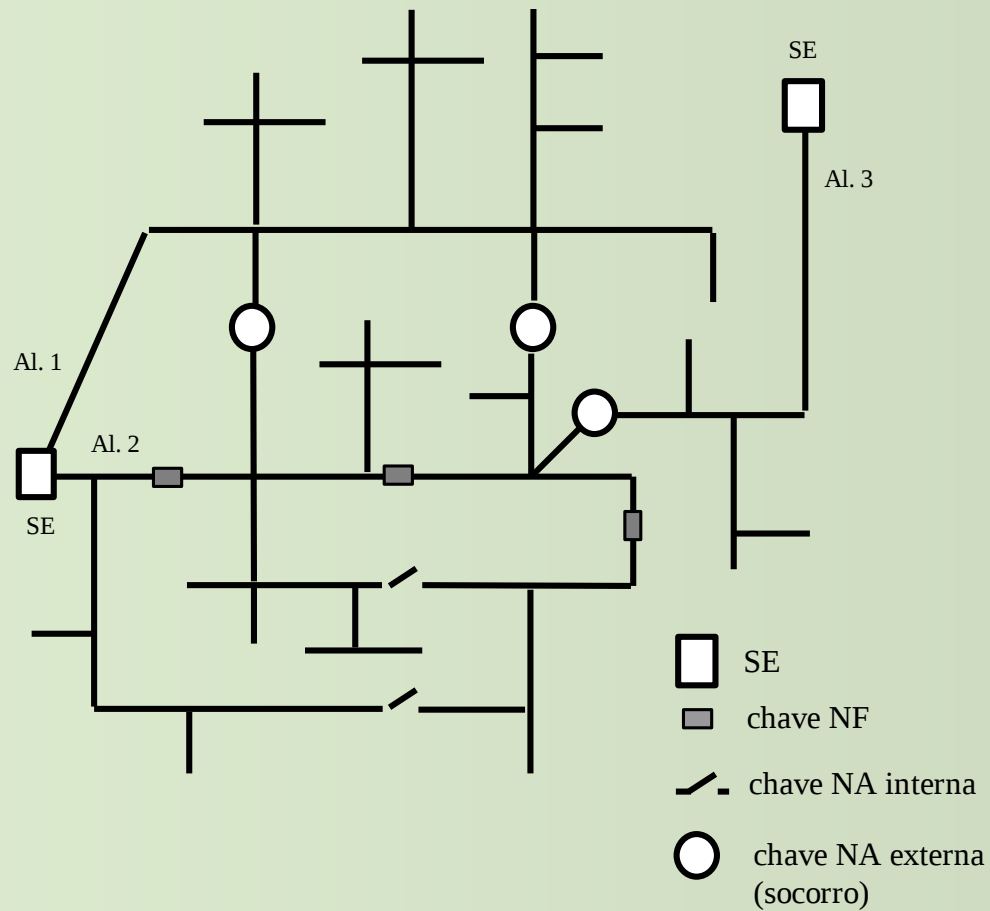
Estrutura Hierárquica:



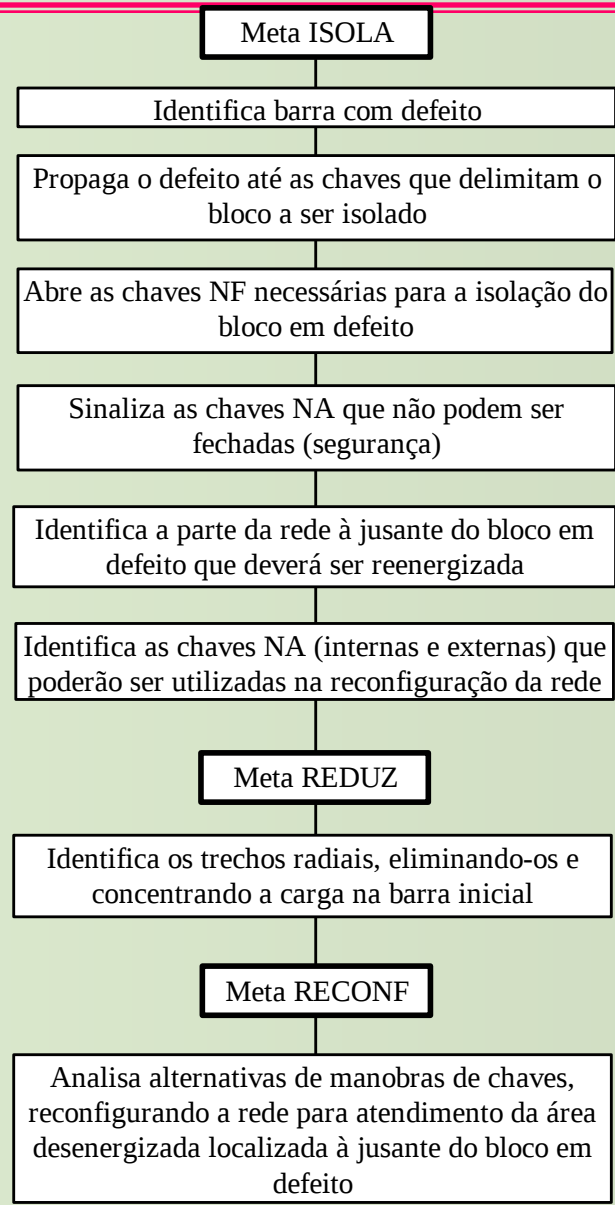
Principais elementos do CDP

- **metas:** definem o problema e são dinamicamente geradas pela aplicação dos operadores durante o processamento ;
- **frames:** representam classes e objetos de um problema específico ;
- **operadores:** entidades que podem ser aplicadas quando um conjunto de condições é satisfeito. A sua aplicação resulta em novas sub-metas e novas instâncias aos objetos das *frames* ;
- **Restrições:** condições que não podem ser violadas durante o processo .

Exemplo 1: Reconfiguração de redes



Estratégia - reconfiguração



Elementos utilizados

Elemento	Itens no Problema de Reconfiguração
Metas	ISOLA REDUZ RECONF
Frames	BARRA (dados e variáveis de barras) LIGAC (dados e variáveis de ligações) GERA (dados gerais) SIST (resultados globais)
Operadores	ISOLA_TRECHO (meta ISOLA) ISOLA_CHAVE (meta ISOLA) ABRE_NF (meta ISOLA) BLOCO_DES (meta ISOLA) FINALIZA_DEF (meta ISOLA) REDUZ_REDE (meta REDUZ) FECHA_CHAVE (meta RECONF, construtivo) ABRE_CHAVE (meta RECONF, destrutivo) FINALIZA_RECONF (meta RECONF)
Restrições	Máxima queda de tensão Máximo carregamento de cabos Máximo carregamento de subestações Limites de índice de mérito

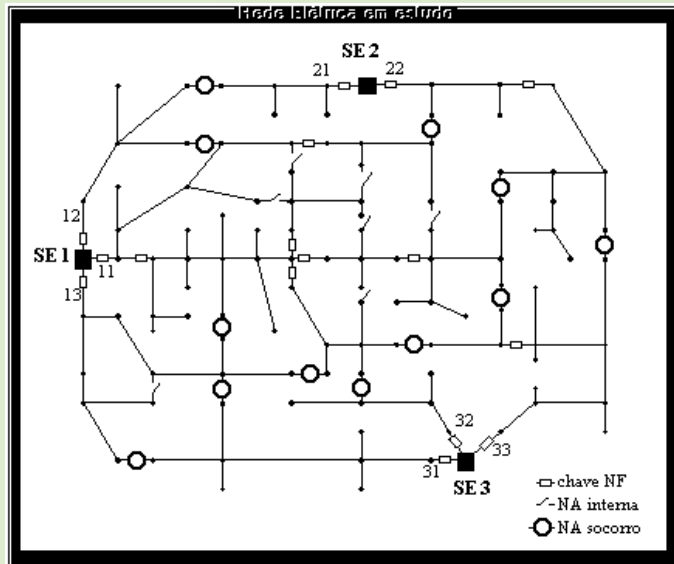
Frames

```
(frame_templates,
  (BARRA, tipo: s, ger: r, potat: f, potre: f, estado: s, coorx: i, coory: i,
    dvbar: r),
  (LIGAC, inibar: s, fimbar: s, estado: s, fluxo%: f, capacidade: r,  zr: r,
    zx: r, comp:r, elem: s, tipo: s),
  (SIST, novosub: p, maxfluxo: f, maxdv: f, custo: f, merito: f, indice: f,
    fsemax: f, fsetot: f, estado: s, alfa_ind: r, alfa_dv: r, alfa_car, r, alfa_se:
    r, malha_ilh: r,),
  (INDICE, custo: f, merito: f, indice: f),
  (GERAL, pcost: fs, pmer: fs, f1car: r, f2car: r, f1tens: r, f2tens: r, n1car:
    r, n2car: r, n3car: r, pcar: r, n1tens: r, n2tens: r, n3tens: r, ptens: r)
)
(frame_instancias,
  (BARRA,
    (BAR01,subes,0.3,.000,.000,.000,.000,.000,.000,CON,100,900,.0)
    (BAR02,carga,0.0,.012,.011,.013,.006,.005,.006,CON,700,900,.0)
    (BAR03,carga,0.0,.020,.019,.021,.015,.014,.016,CON,800,600,.0)
    .....
    .....
  )
  (LIGAC,
    (LIG01,BAR01,BAR02,USADA,.0,.0,.0,.12,.1,.2,2.3,TRECHO, )
    (LIG02,BAR01,BAR03,USADA,.0,.0,.0,.12,.1,.2,1.5,TRECHO, )
    (LIG03,BAR02,BAR04,USADA,.0,.0,.0,.12,.1,.2,1.5,TRECHO, )
    .....
    .....
    (LIG53,BAR47,BAR46,USADA,.0,.0,.0,.08,.1,.2,0.1,CHAVE,NF)
    .....
    (LIG82,BAR28,BAR53,ABERTA,.0,.0,.0,.12,.1,.2,0.5,CHAVE,NA)
    .....
    .....
  )
  .....
  .....
  (GERAL,
    (GERA1,mi,m,70.,90.,0.9,0.95,10.,7.,1.,1.,1.,7.,10.,1.)
  )
)
```

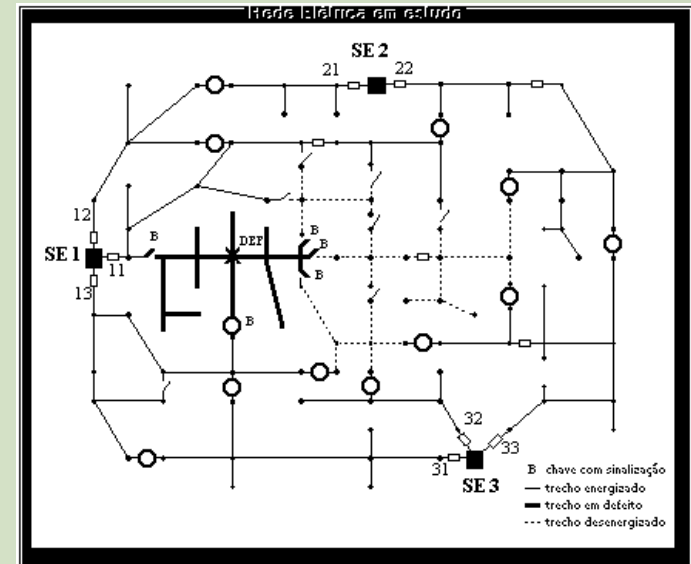
Exemplo de operador

```
(FECHA_CHAVE,
 (variaveis,
  (?usa:s,?abre:s,?chav:s,?desl:s,?inibar:s,?fimbar:s,linha:
   LIGAC,?sis:SIST,?sub:SIST)
 )
 (meta_aplicavel,(Reconf,?sis))
 (dado_que,
  (let,?usa,USADA),
  (let,?abre,ABERTA),
  (let,?chav,CHAVE),
  (let,?desl,DESL ),
  (xmatch,?linha(.elem,?chav,.estado,?abre,:inibar:BARRA.
   estado,?ener, :fimbar:BARRA.estado,?desl)),
  (let,?inibar,?linha.inibar),
  (let,?fimbar,?linha.fimbar),
 )
 (contingencias,(def,?linha))
 (novas_instancias,(?sub))
 (novas_atribuicoes,
  (atribua,?sis.novosub,?sub),
  (atribua,?linha.estado,?usa),
  (atribua,?fimbar:BARRA.estado,?ener),
  (fluxo_fuzzy,?sis),
  (atribua,?sub.custo,?sis.custo),
  (atribua,?sub.maxfluxo,?sis.maxfluxo),
  (atribua,?sub.maxdv,?sis.maxdv),
  .....
  .....
 )
 (novas_metas,
  (Reconf,?sub)
 )
 )
```

Configurações inicial / bloco em defeito

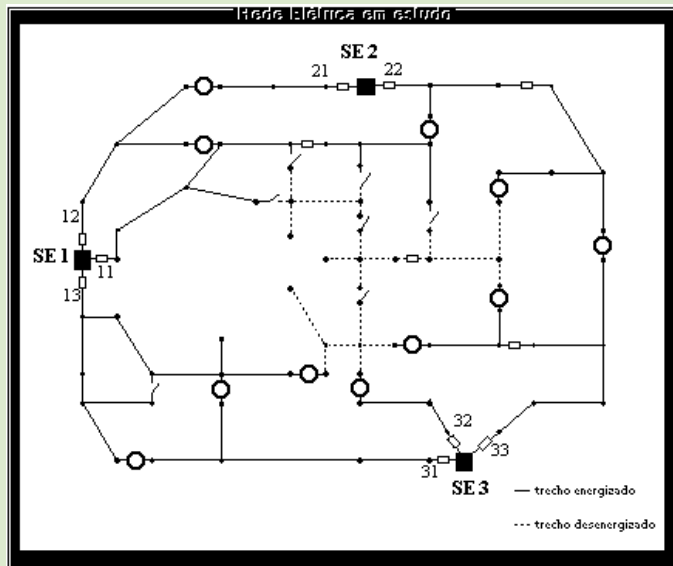


Rede p/ análise

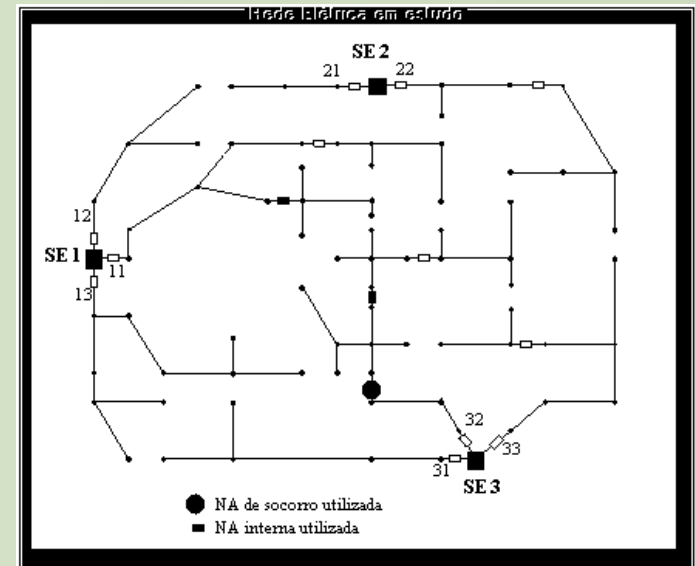


Bloco em defeito

Configurações – bloco isolado e ótima



Bloco isolado e área desenergizada

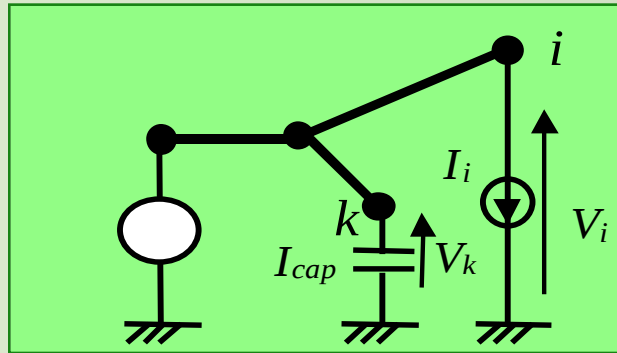


Melhor solução encontrada

Exemplo 2: Alocação de bancos de capacitores

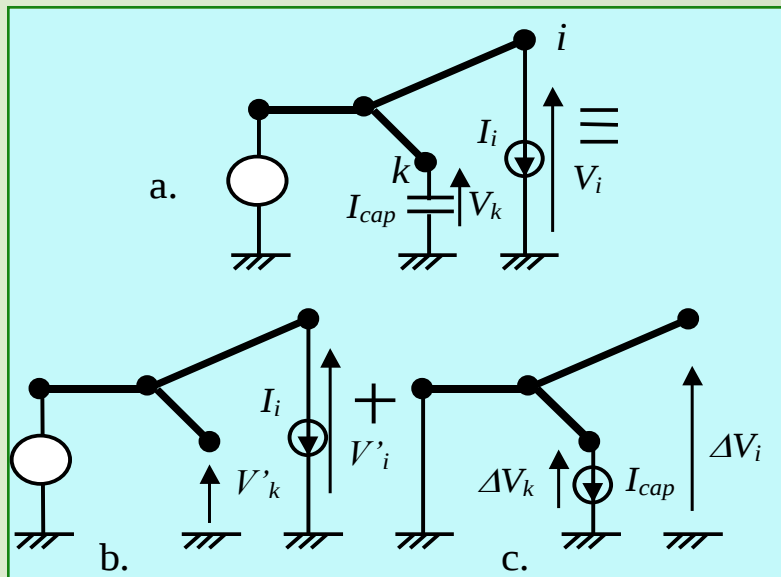
Ganho de tensão:

$$Ganho_k = \sum_{i \in \Omega_b} \Delta V_i / Custo_{cap}$$



Capacitores em derivação

Variação de tensão devido a um capacitor na rede



$$V_k = V'_k - z_{kk} j q_{cap} V_k \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_k = \frac{V'_k}{1 + j z_{kk} q_{cap}} \cong \frac{V'_k}{1 - x_{kk} q_{cap}}$$

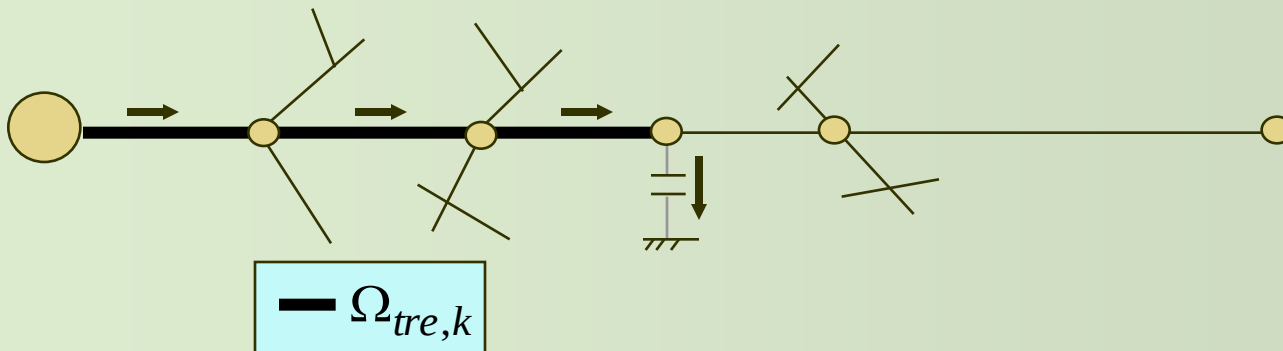
Capacitores em derivação

Variação de perdas

$$\sum_{pq \in \Omega_{tre,k}} \Delta p_{qp}$$

onde:

$$\Delta p_{qp} = R_{pq} I_{cap,k} (2I_{i,pq} - I_{cap,k})$$



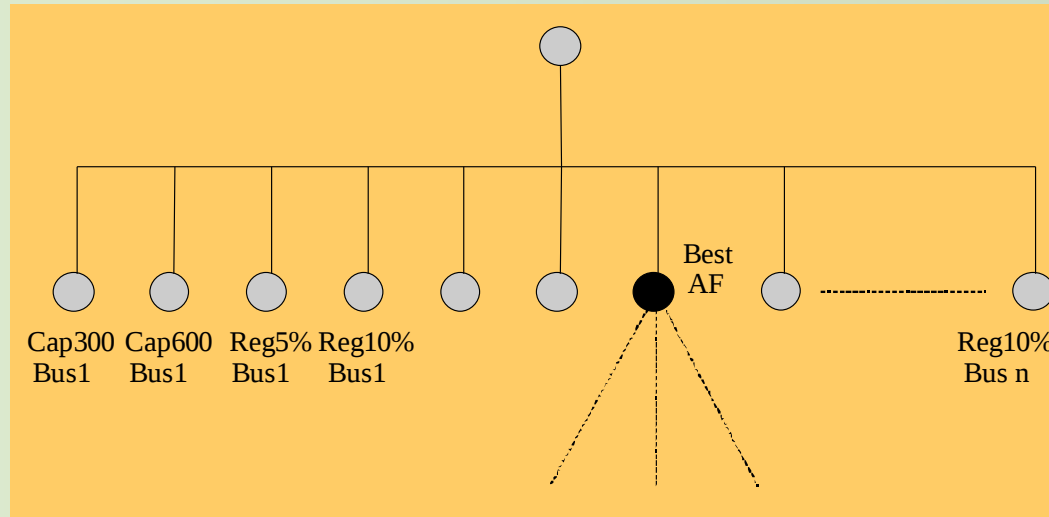
Modelamento no CDP

CDP Elementos	Items in the Planning Problem
Frames	BUS (bus data and variables) CONNECTION (feeder data & variables) SECTOR (delimited by switches) SYSTEM (global results)
Operadores	STATE_PRESENT INSTALL_CAP INSTALL_REG FINALIZE
Restrições	Capacity limits Voltage limits Losses variation
Meta	STATE INSTALL

*Operador **INSTALL_CAP***

```
(INSTALL_CAP
  (variables,
    bus:BUS,?sector:SECTOR,?sys:SYST,
    ?sub:SYST))
  (applicable_goal, (Install,?sys))
  (provided_that,
    (match,?bus (namebl:SECTOR.capac,''))))
  (contingencies, (fault,?bus))
  (new_instances, (?sub))
  (new_assignments,
    (assign,?sys.newsub,?sub)
    (install_cap,?bus)
    (flow_fuzzy,?sys)
    (fprint,?bus)
    (assign,?sub.loss,?syst.loss),
    (assign,?sub.n_bancos,?sist.n_bancos)
  )
  (new_goals,
    (Instal,?sub))
)
```

Estrutura de preferências

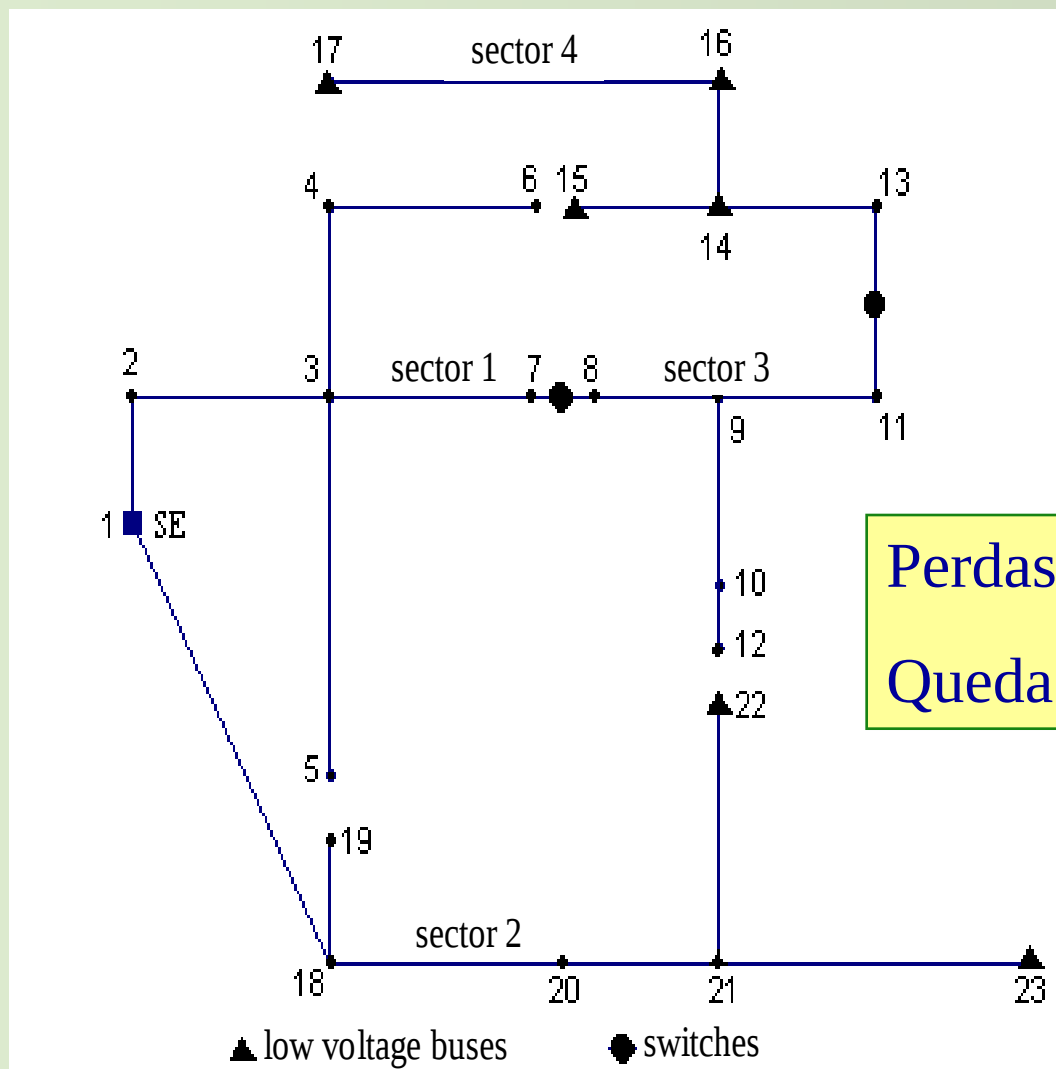


$$AF = \max \left(\frac{p_{losses} G_{\Delta losses} + p_{gain} G_{\Delta v}}{p_{losses} + p_{gain}} \right)$$

$$G_{\Delta losses} = \frac{C_{losses} \sum_{pq \in \Omega_{tre,k}} \Delta p_{qp}}{C q_{cap}}$$

$$G_{\Delta v} = \frac{C_{\Delta v} \sum_{i \in \Omega_b} \Delta V_i}{C q_{cap} (or C_{reg})}$$

Caso de alocação de capacitores



Estado inicial

Perdas: 551 kW

Queda tensão: 8.1 %

Alocação de bancos de capacitores

Caso 1:

- Instalação de 300 kVAr em bancos para levar as tensões para a faixa aceitável (max. queda de tensão de 7.5%);
- Meta de minimização de custo de investimentos.

Resultados:

- 2 unidades (buses 16 ou 17* e 23);
- Perdas: 528 kW (redução de 4%),
- Queda de tensão: 7,48%.

*Instalação na barra 17 ocorre quando perdas são consideradas

Algoritmos evolutivos

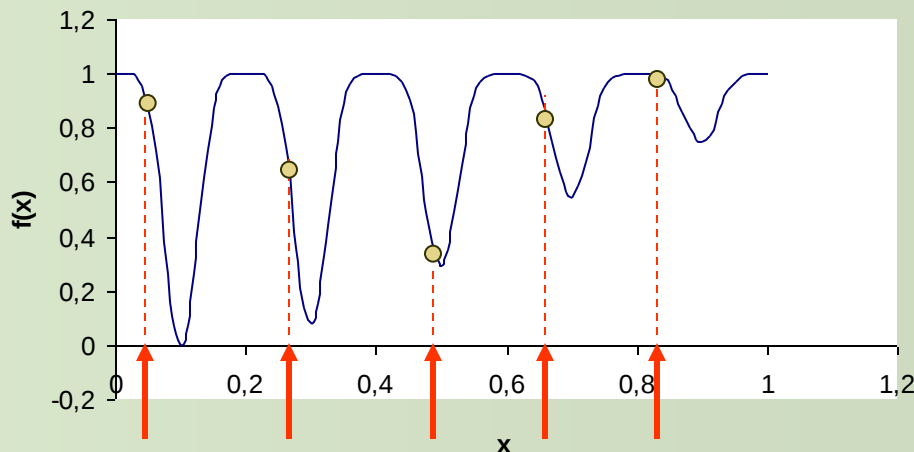
- Principais conceitos
- Algoritmos Genéticos
- Estratégias Evolutivas
- Exemplos ilustrativos e de aplicação
- Utilização do software OTIMIZA

Computação evolutiva

Algoritmos genéticos (AG)

Estratégias evolutivas (EE) - Algoritmos Evolutivos (AE)

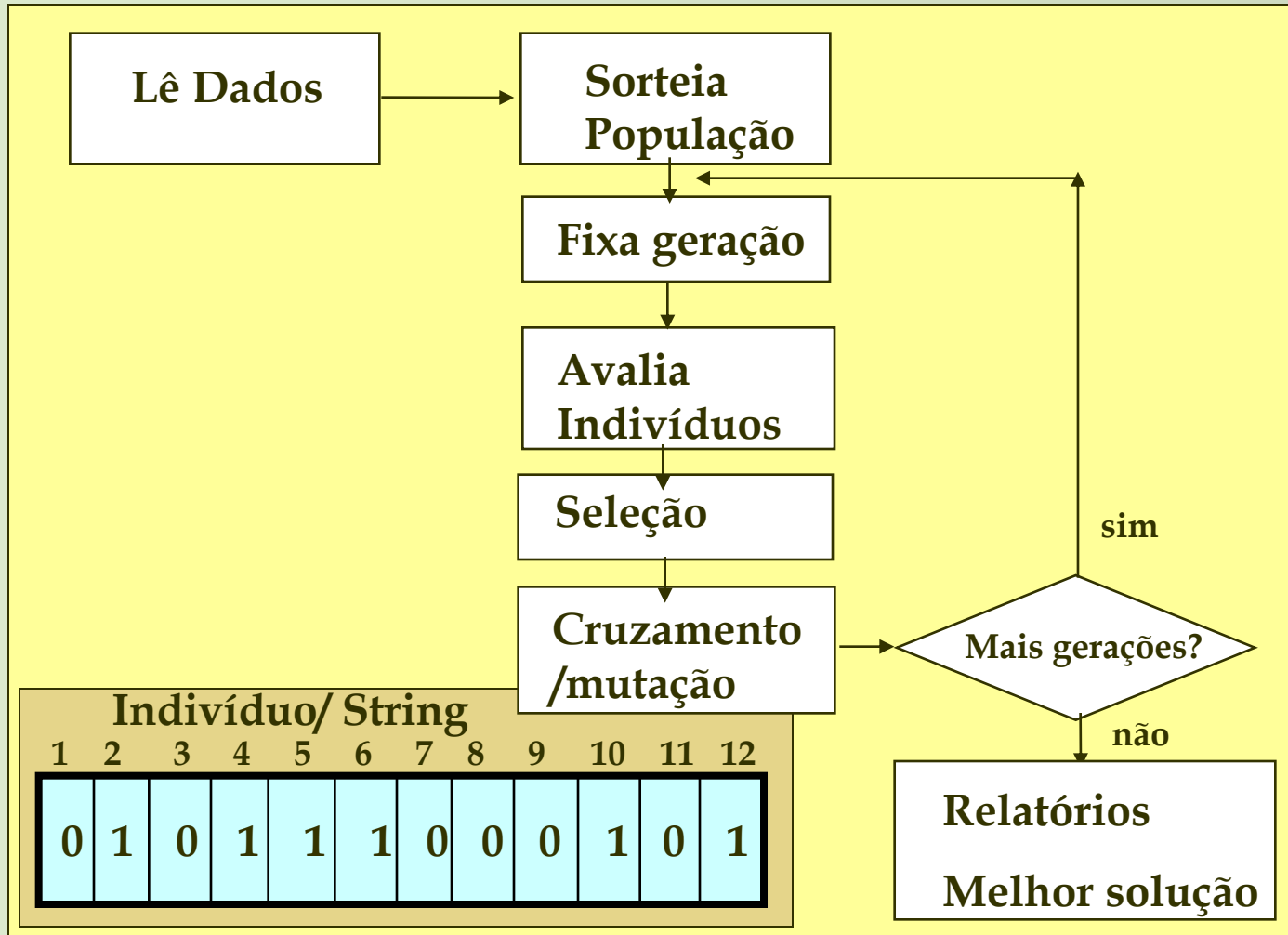
- Indivíduo
- População
- Seleção
- Reprodução
- Mutação



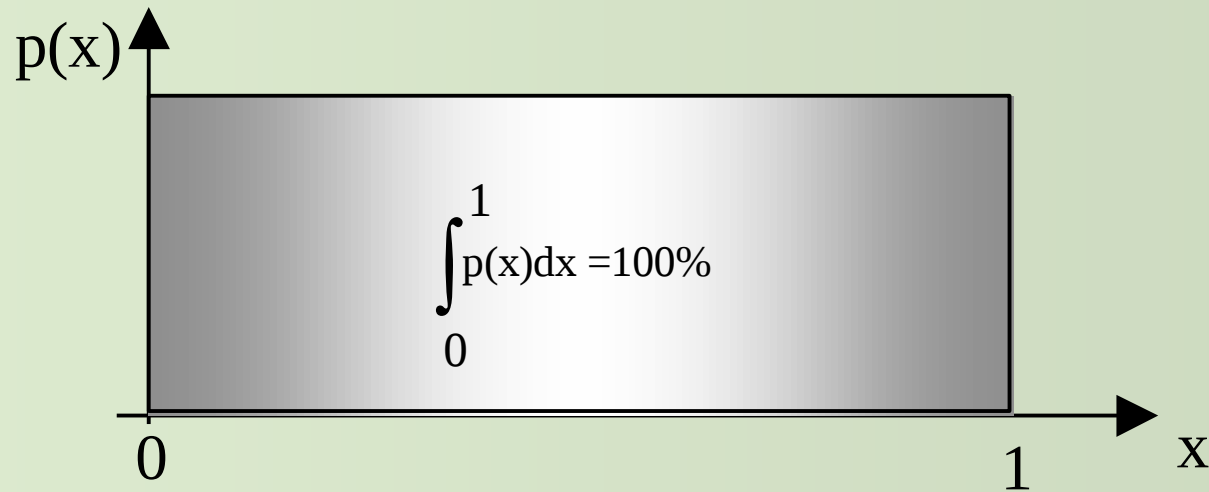
Bases de Algoritmos Genéticos

- Codificação do conjunto de parâmetros
- Desenvolvimento a partir de uma população de soluções alternativas
- Utilização de informação da função objetivo
- Regras de transição probabilísticas para busca no espaço de soluções.

Algoritmo Básico



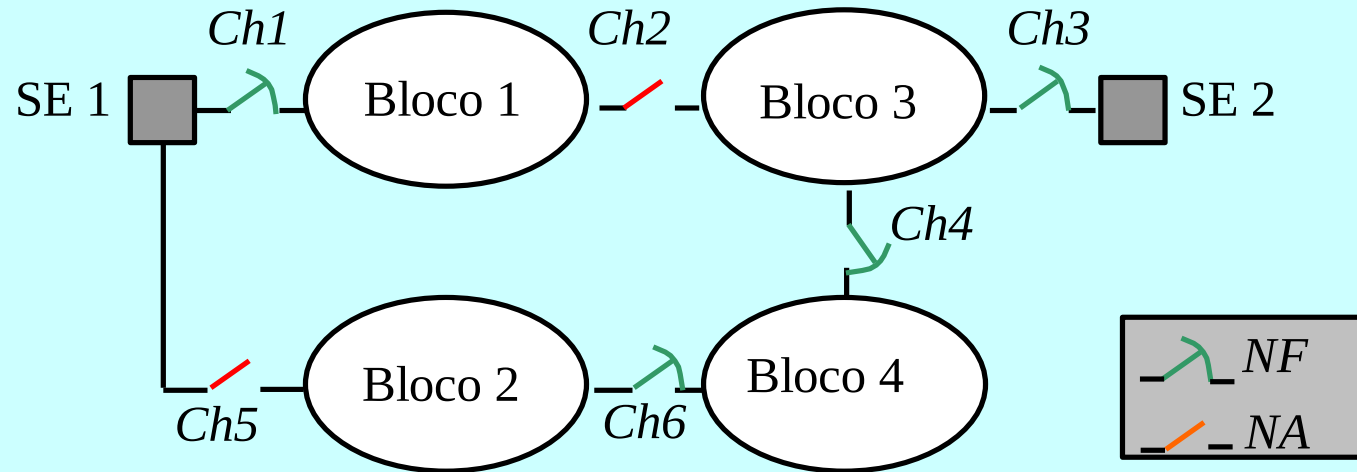
Distribuição uniforme / sorteios



Exemplo - Codificação String

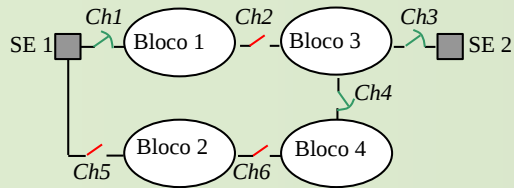
string

1	2	3	4	5	6
1	0	1	1	0	1

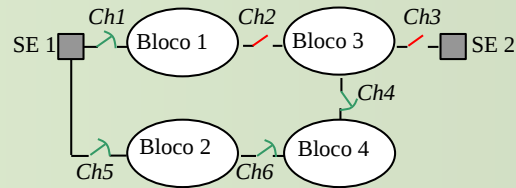


Configuração correspondente

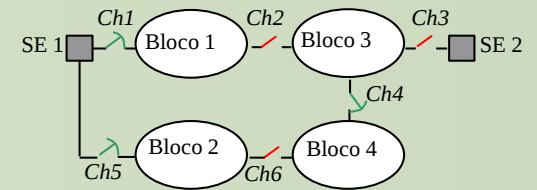
Configurações iniciais – sorteio



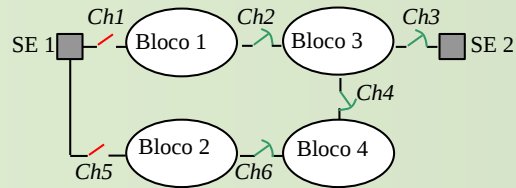
1	2	3	4	5	6
1	0	1	1	0	1



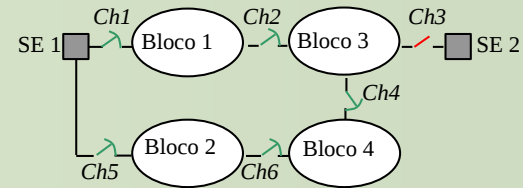
1	2	3	4	5	6
1	0	0	1	1	1



1	2	3	4	5	6
1	0	0	1	1	0



1	2	3	4	5	6
0	1	1	1	0	1

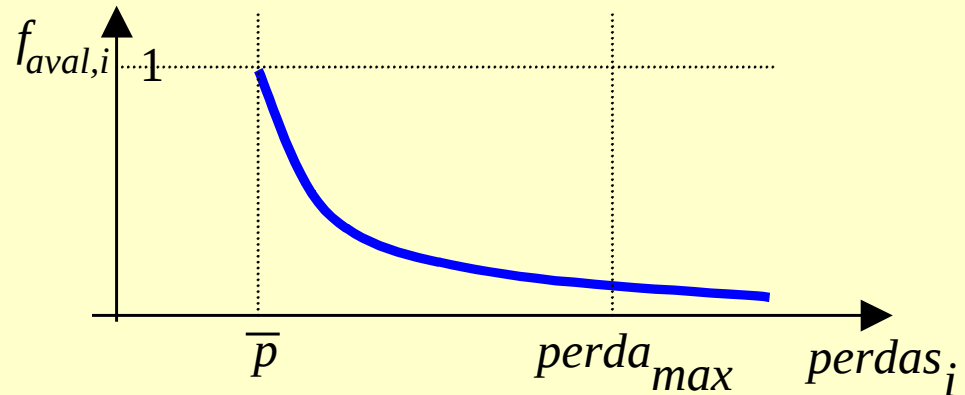


1	2	3	4	5	6
1	1	0	1	1	1

Função de Avaliação

Exemplo sem restrições:

$$f_{aval,i} = \frac{\bar{p}}{perdas_i}$$



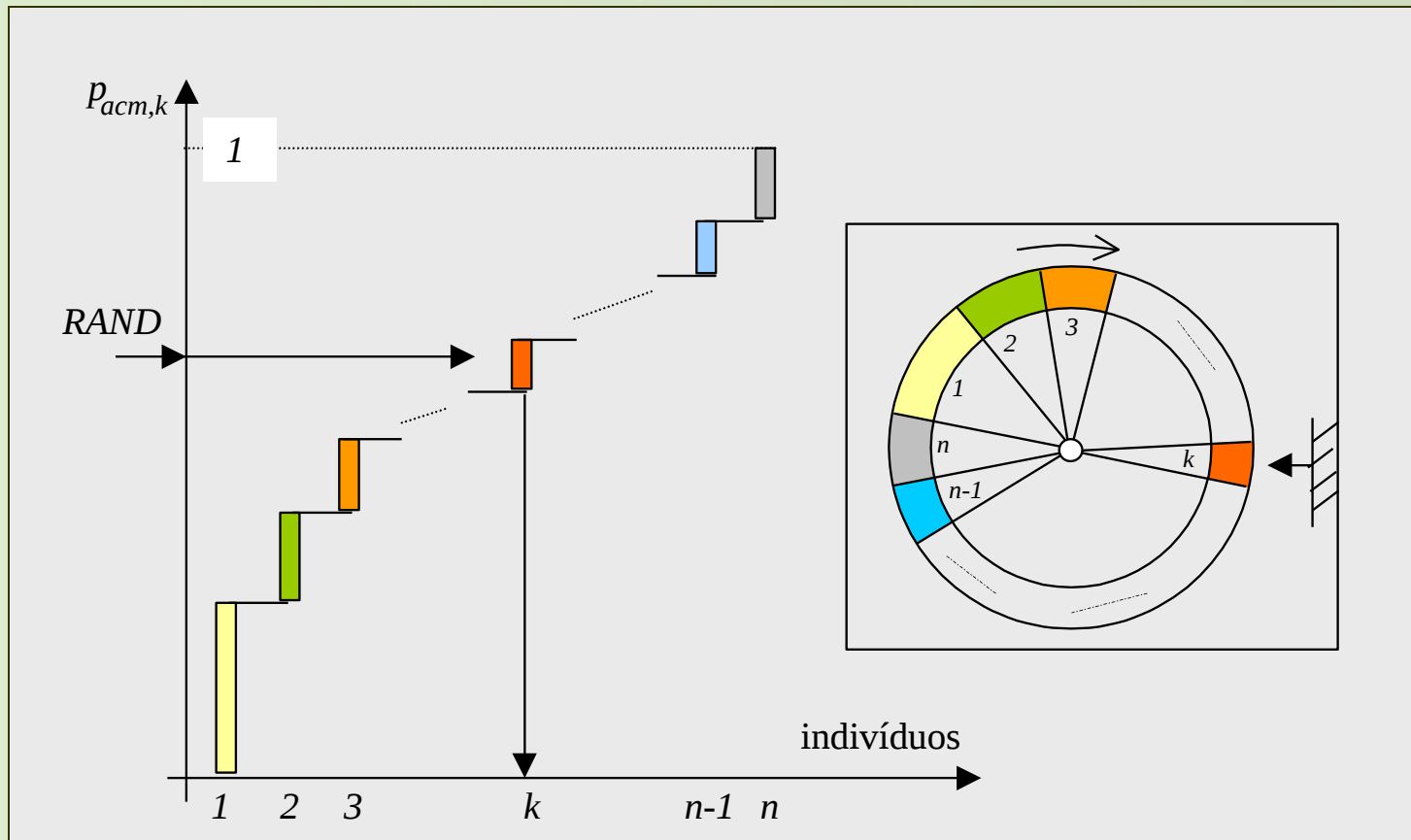
com restrições:

$$f_{aval,i} = \frac{\bar{p}}{perdas_i + r.Penal_i}$$

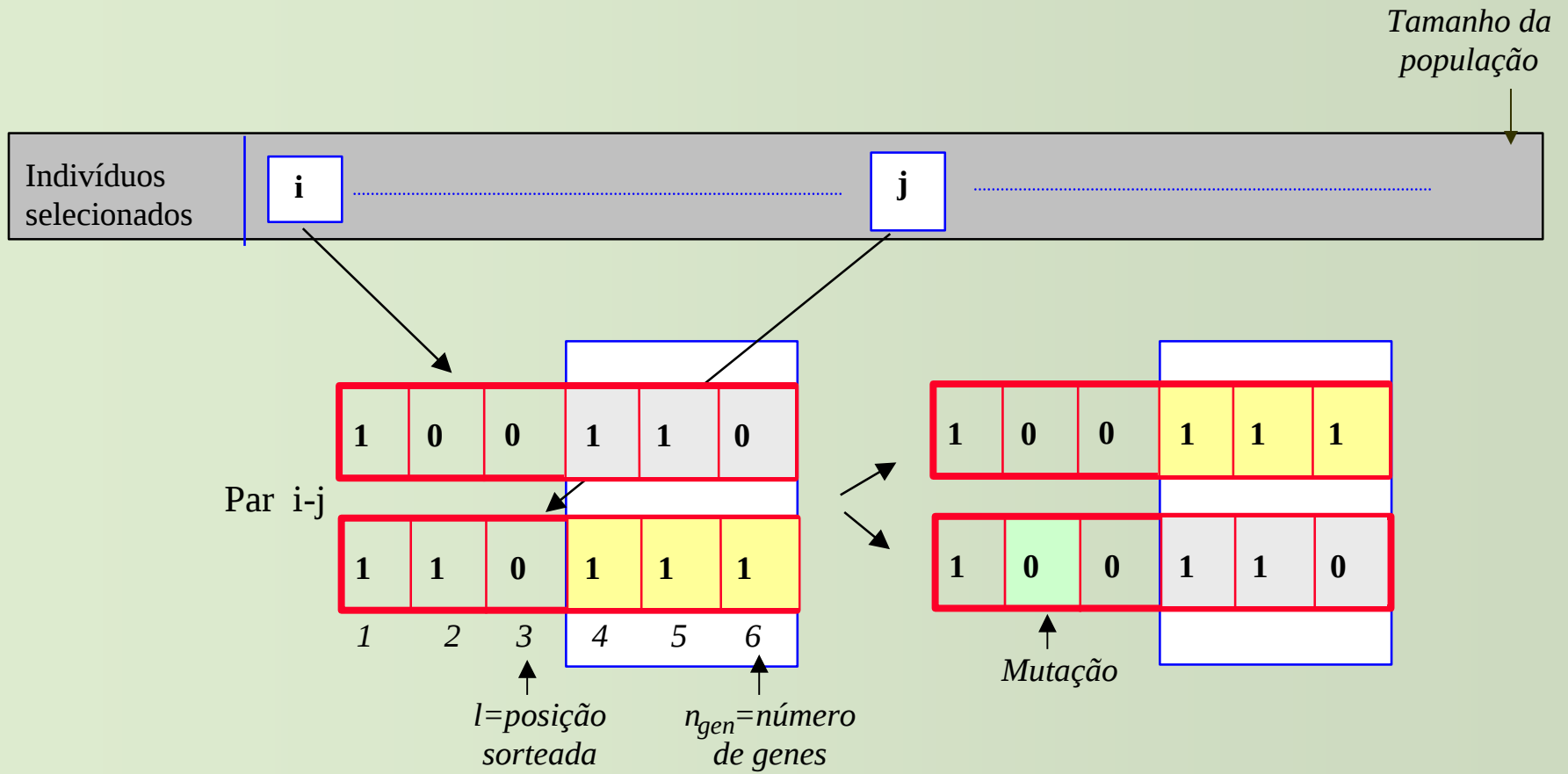
$$Penal_i = \sum_{j=1}^n \left\{ \max[0, h_j(\mathbf{x})] \right\}^k$$

Reprodução / seleção

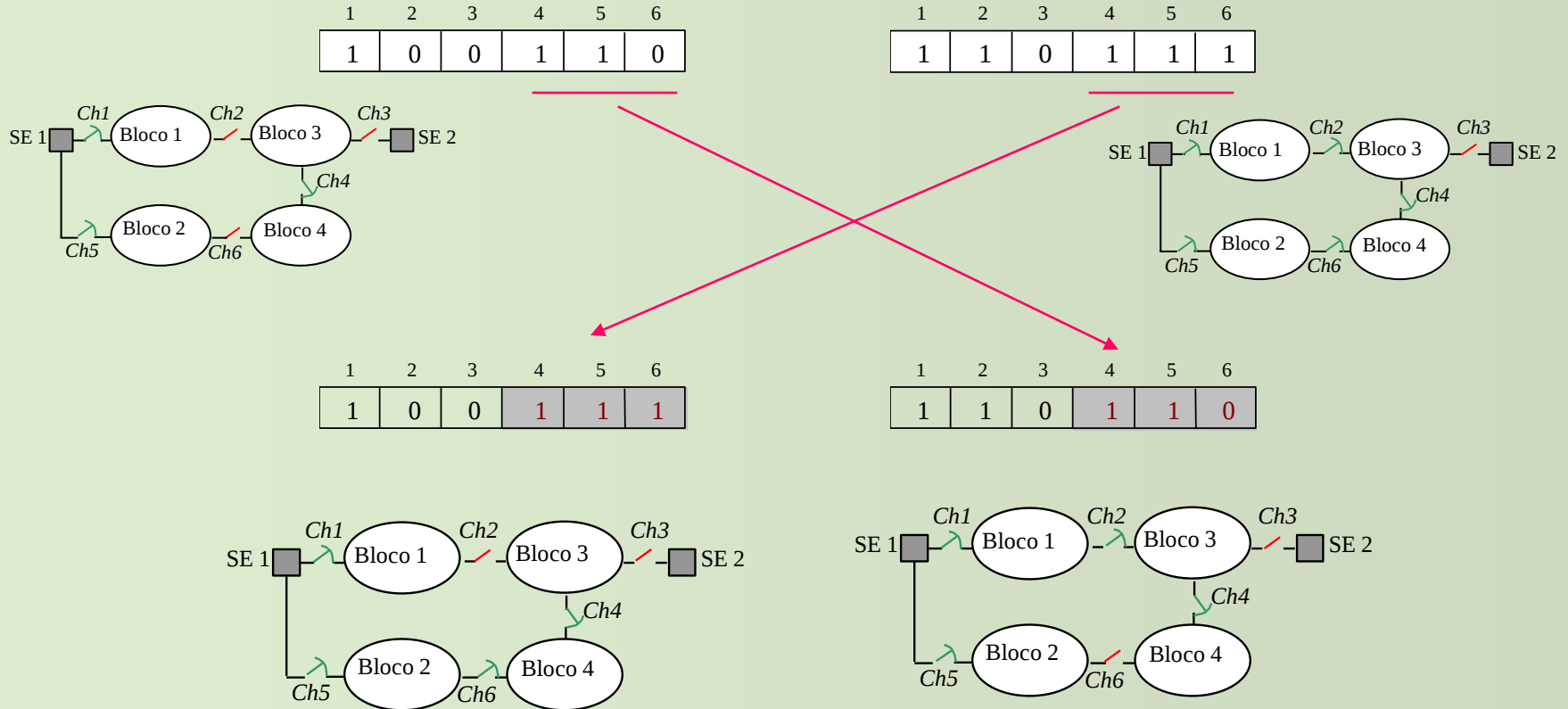
Método da roleta:



Cruzamento e Mutação

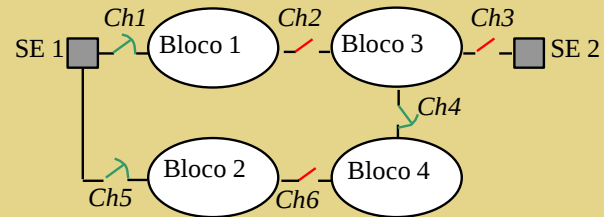


Cruzamento na população - exemplo

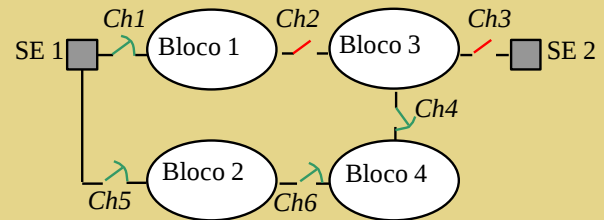


Mutação do indivíduo 3 (exemplo)

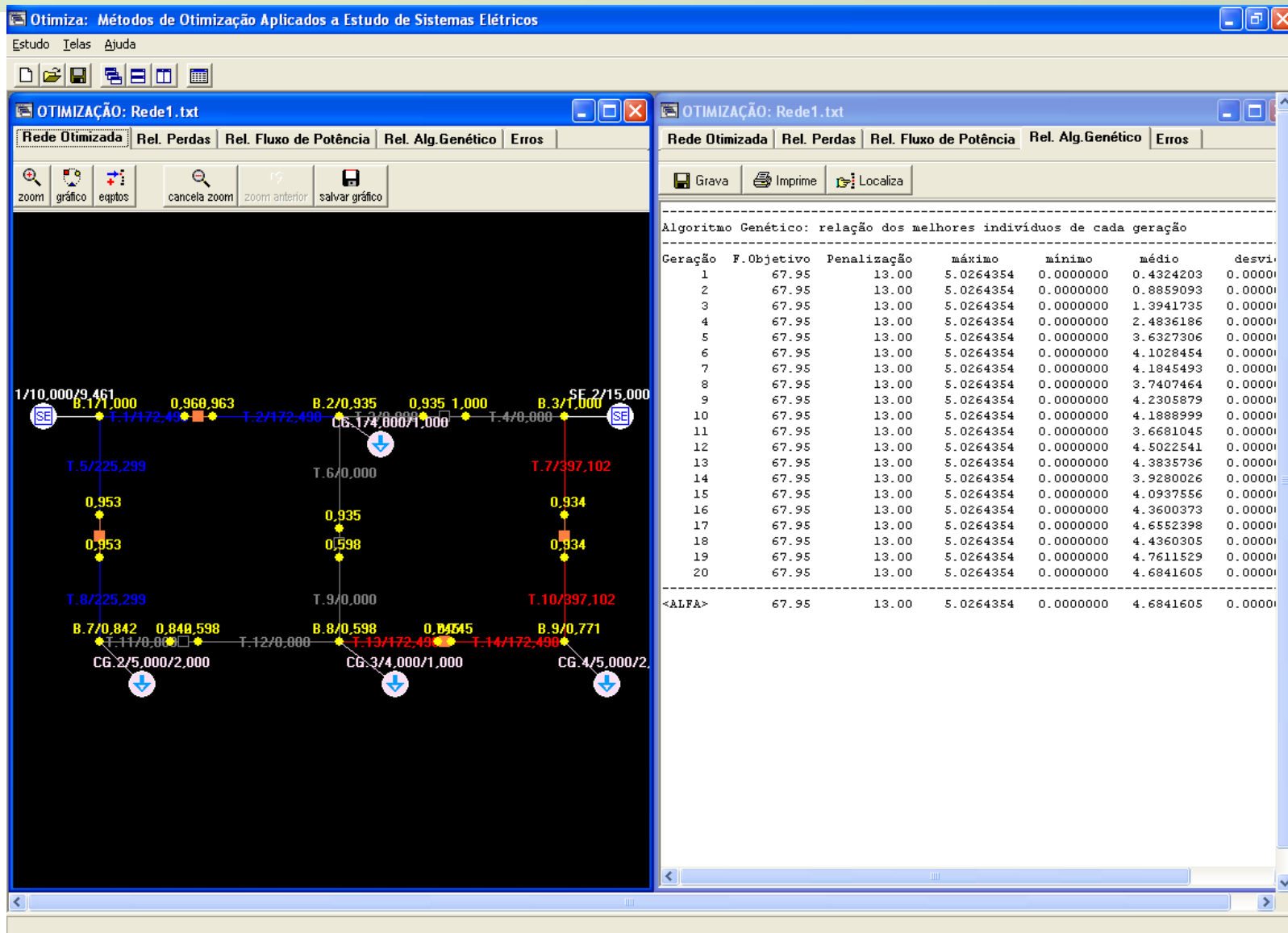
1	2	3	4	5	6
1	0	0	1	1	0



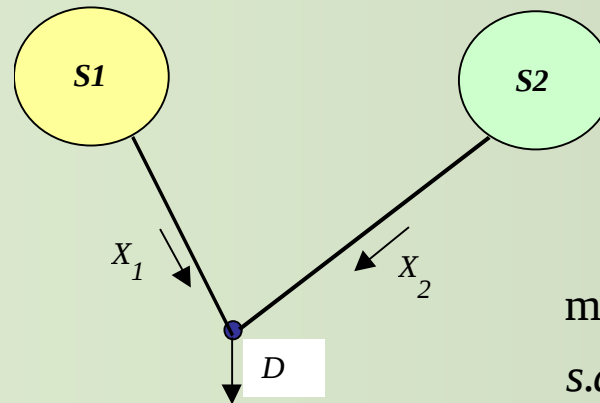
1	2	3	4	5	6
1	0	0	1	1	1



Minimização Perdas por AG



Exemplos ilustrativos

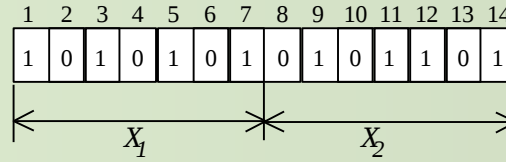


$$\begin{aligned} \min p_{tot} &= r_1 X_1^2 + r_2 X_2^2 \\ \text{s.a.} \quad &X_1 + X_2 \geq D \end{aligned}$$

$$\min p_{tot} = r_1 X_1^2 + r_2 (D - X_1)^2 = (r_1 + r_2) X_1^2 - 2r_2 D X_1 + r_2 D^2$$

$$X_1 = \frac{r_2}{r_1 + r_2} D; \quad X_2 = \frac{r_1}{r_1 + r_2} D \text{ e } p_{tot} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} D^2$$

Resolução por AG

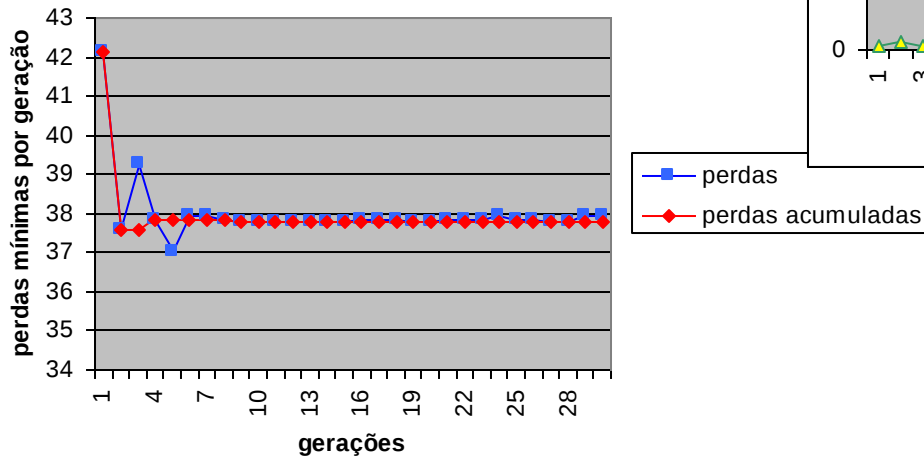
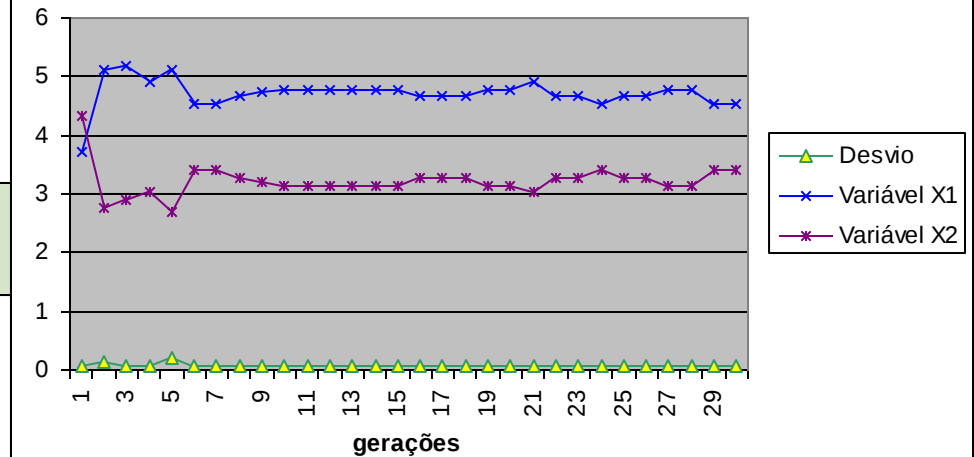
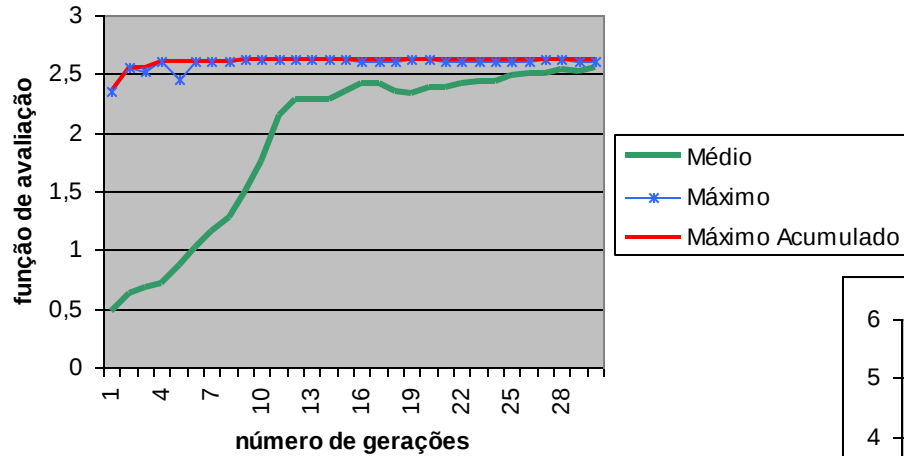


$$X_{1,i} = \frac{(2^0 \text{bit}_{i,1} + 2^1 \text{bit}_{i,2} + 2^2 \text{bit}_{i,3} + 2^3 \text{bit}_{i,4} + 2^4 \text{bit}_{i,5} + 2^5 \text{bit}_{i,6} + 2^6 \text{bit}_{i,7})}{(2^7 - 1)} X_{\max}$$

$$X_{2,i} = \frac{(2^0 \text{bit}_{i,8} + 2^1 \text{bit}_{i,9} + 2^2 \text{bit}_{i,10} + 2^3 \text{bit}_{i,11} + 2^4 \text{bit}_{i,12} + 2^5 \text{bit}_{i,13} + 2^6 \text{bit}_{i,14})}{(2^7 - 1)} X_{\max}$$

$$f_{obj,i} = r_1 X_{1,i}^2 + r_2 X_{2,i}^2 + r \{\max[0, (D - X_{1,i} - X_{2,i})]\}^2$$

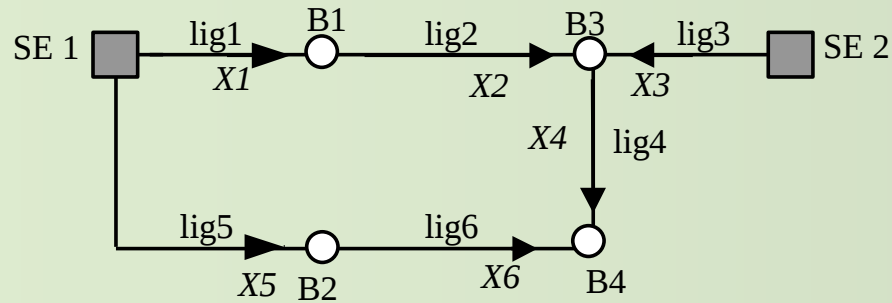
Resolução AG



Resolução AG

Método Utilizado	Variável X_1		Variável X_2		Variável p_{tot}	
	(pu)	erro (%)	(pu)	erro (%)	(pu)	erro (%)
Exato	0,0480	0	0,0320	0	0,00384	0
PL – aproximação 1	0,0800	66,7	0,0000	100	0,00640	66,7
PL – aproximação 2	0,0400	16,7	0,0400	25,0	0,00400	4,2
AG	0,0479	0,2	0,0315	1,6	0,00378	1,6

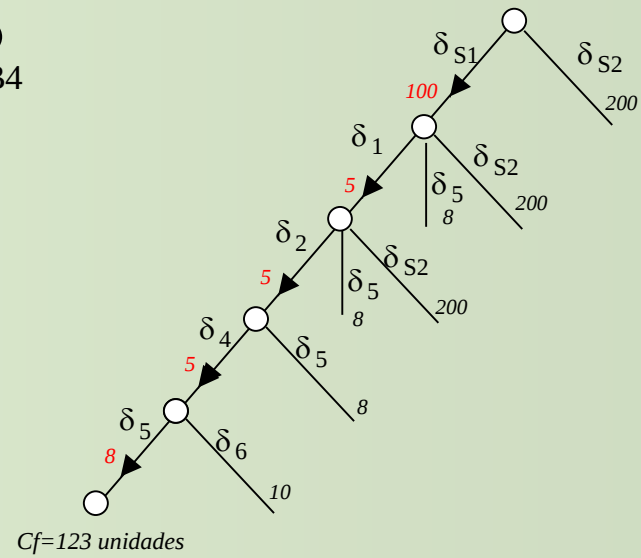
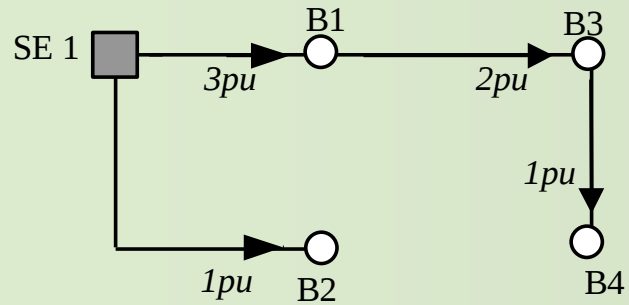
Exemplo 2



$$\min C_f = \min \left(\sum_{i=1}^6 C_i \delta_i + \sum_{j=1}^2 C_{sj} \delta_{sj} \right)$$

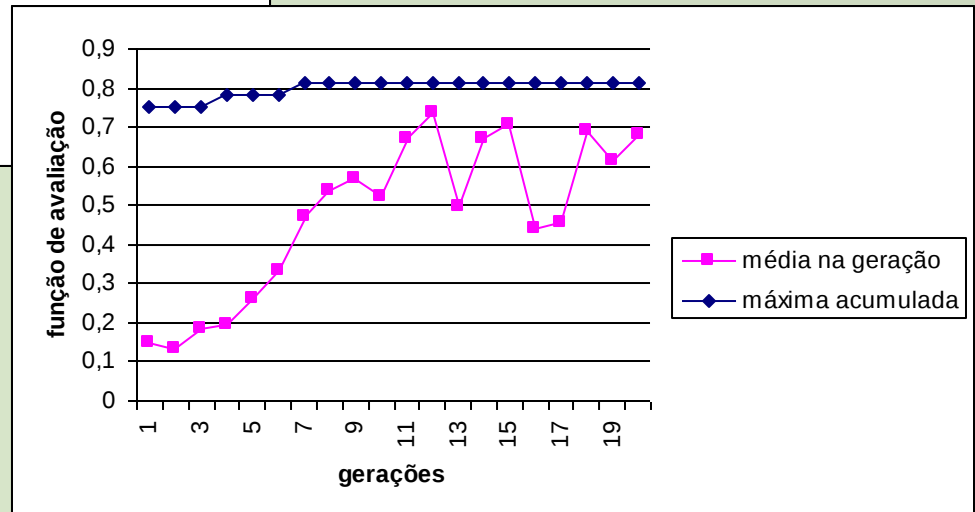
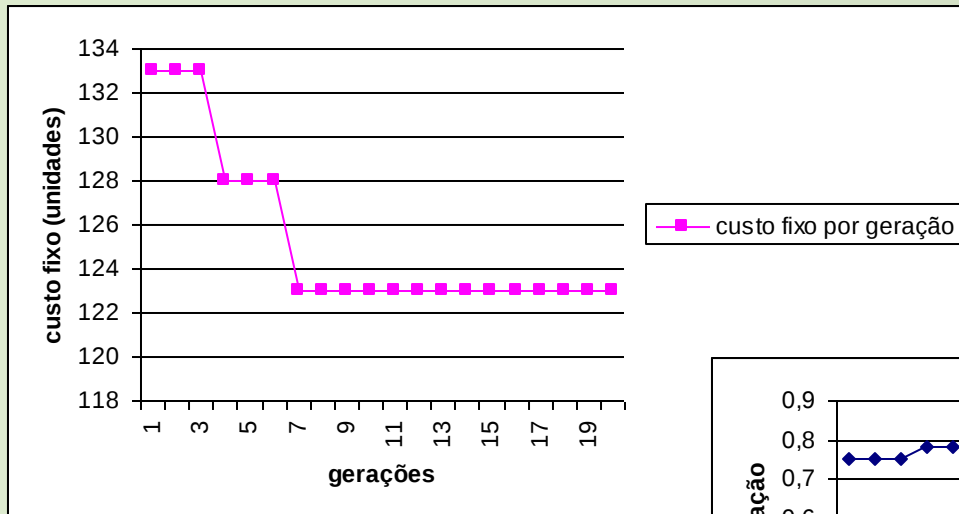
$$\begin{aligned} \text{s.a.} \quad & X_1 - X_2 = D_1 \\ & X_5 - X_6 = D_2 \\ & X_2 + X_3 - X_4 = D_3 \\ & X_4 + X_6 = D_4 \\ & X_i - M\delta_i \leq 0, \quad i = 1, \dots, 6 \\ & X_1 + X_5 - M\delta_{s1} \leq 0 \\ & X_3 - M\delta_{s2} \leq 0 \\ & \delta_i, \delta_{sj} \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

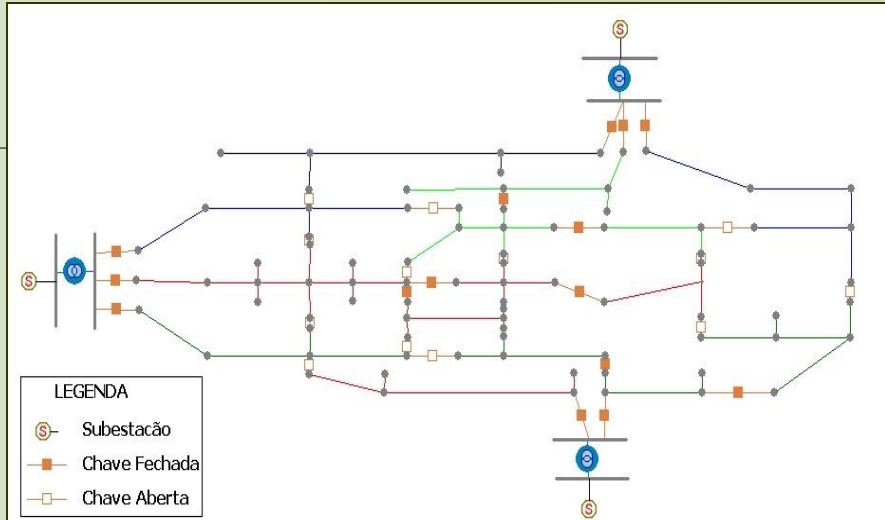
Exemplo 2



Exemplo 2 – por AG

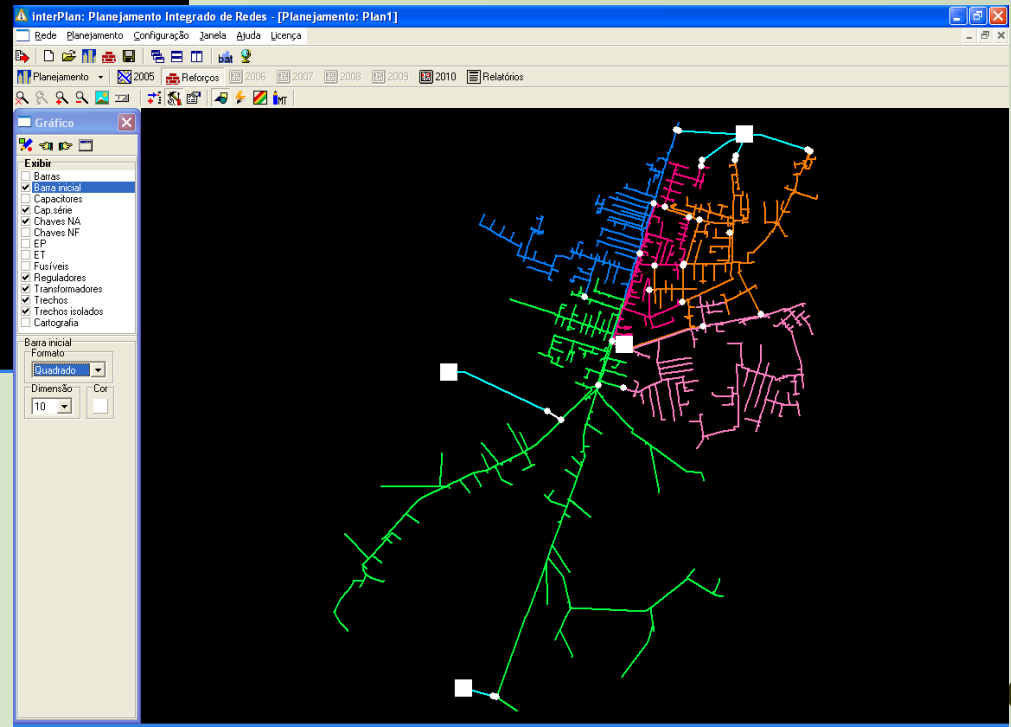
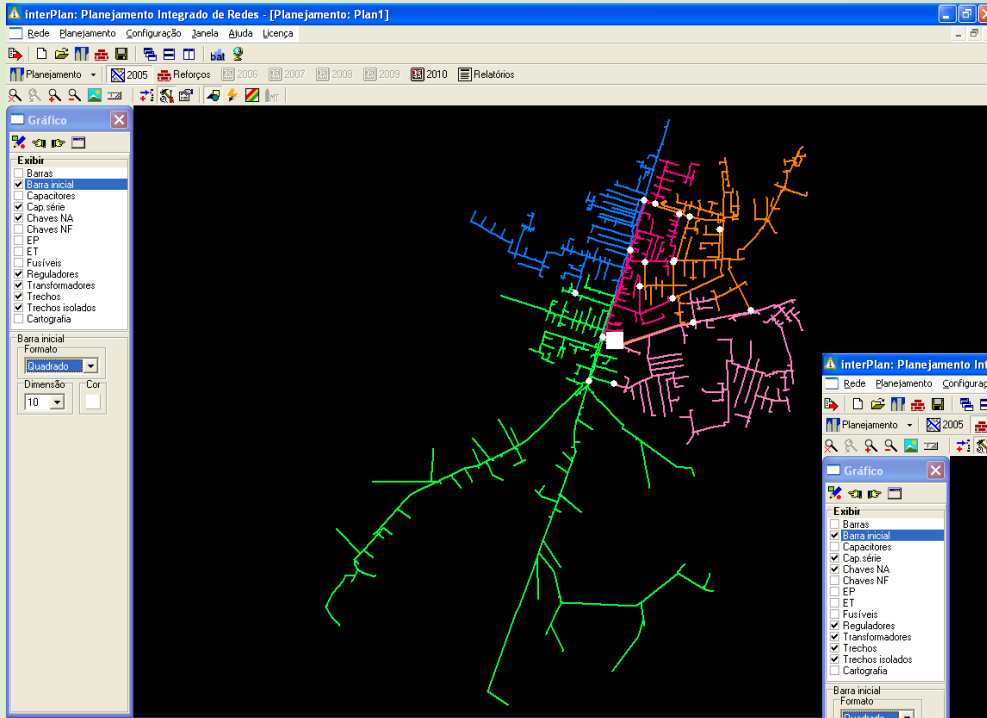
$$f_{obj,i} = C_{f,i} + r.penali$$





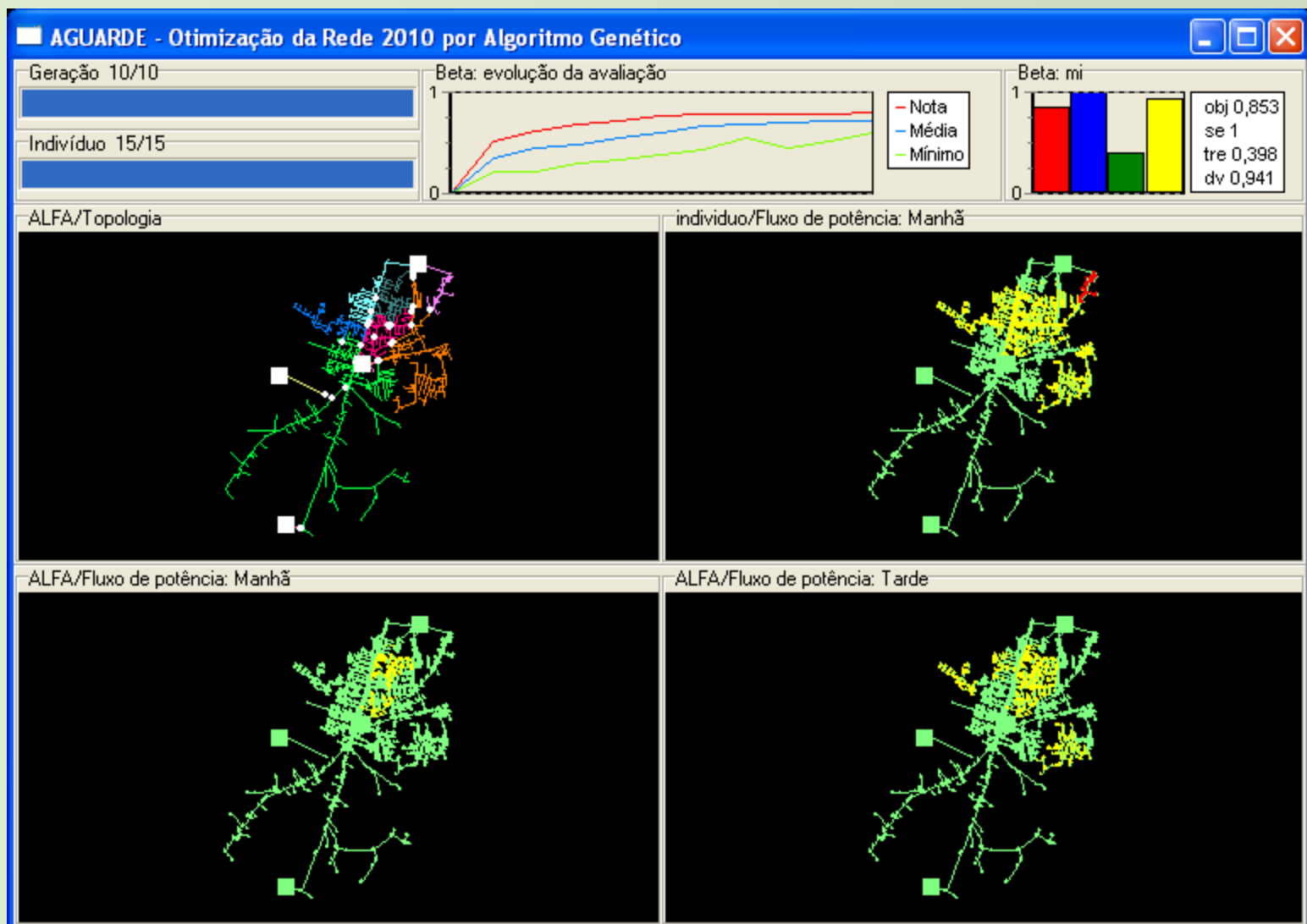
Planejamento Expansão - AG

Configuração
← ano inicial

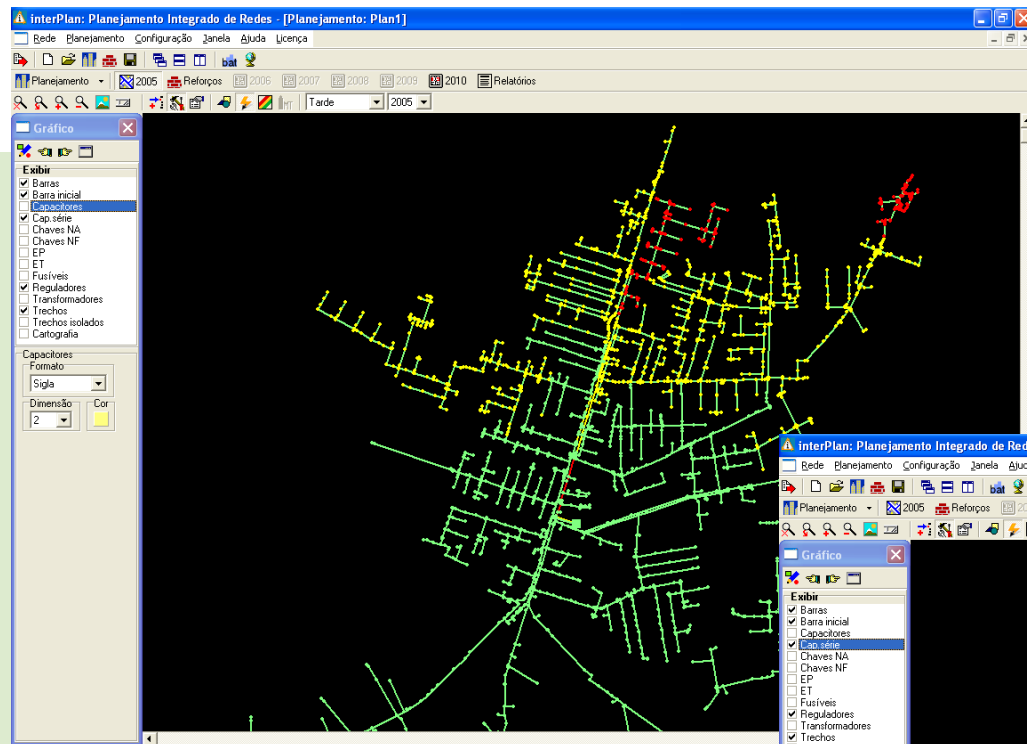


Reforços propostos →

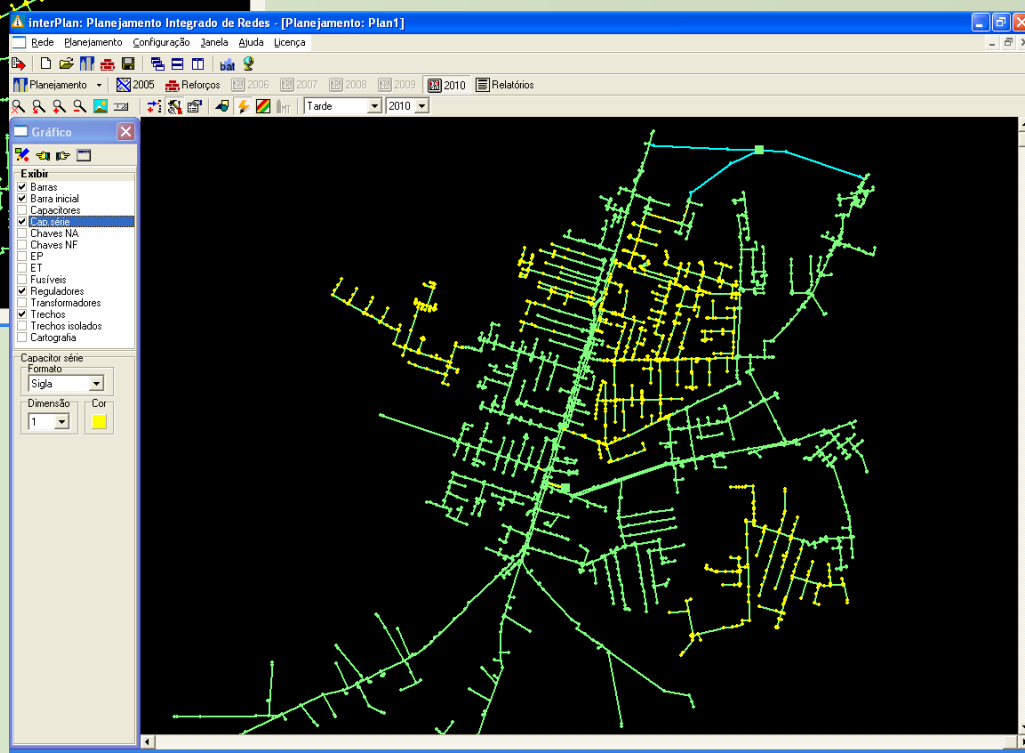
Planejamento Expansão - AG



Planejamento Expansão - AG



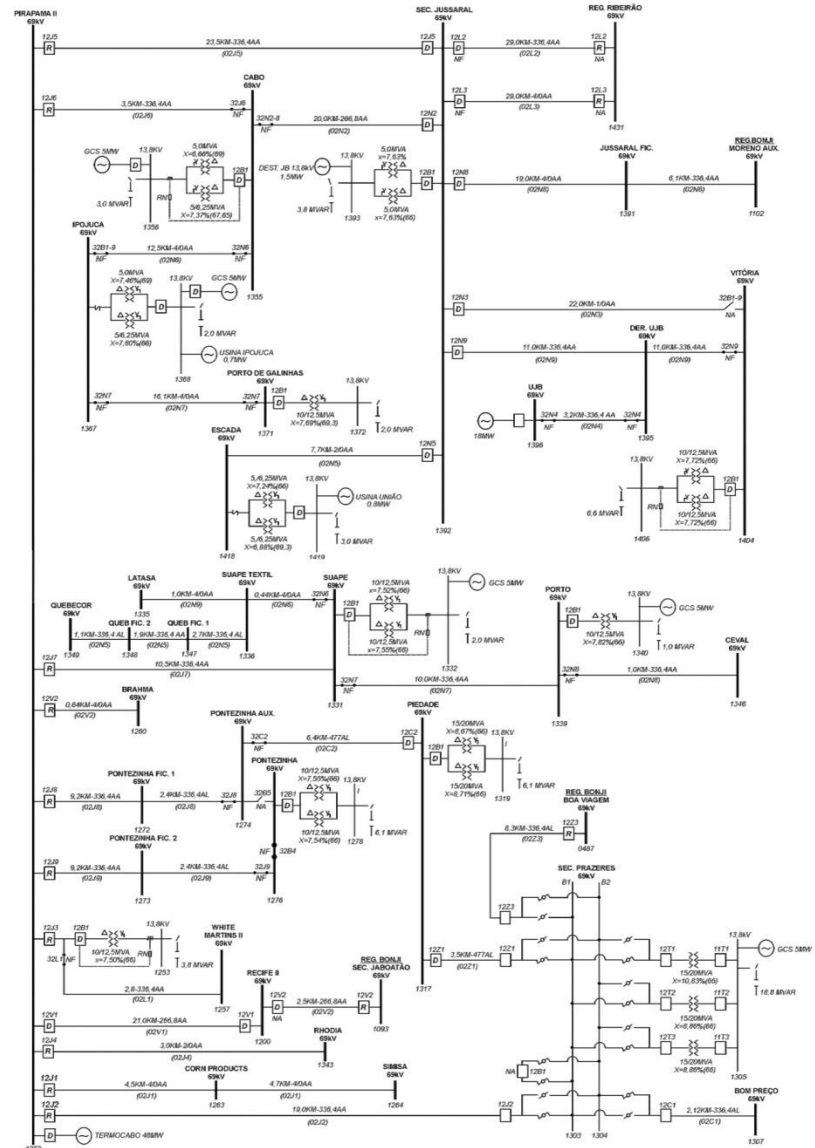
Sem obras
← em 2010



Com reforços →

Alocação de Medidores VTCDs

- Onde instalar medidores de forma que capturem VTCDs em qualquer ponto da rede?
- Qual é a quantidade mínima de medidores de forma que pelo menos um medidor capture uma VTCD?

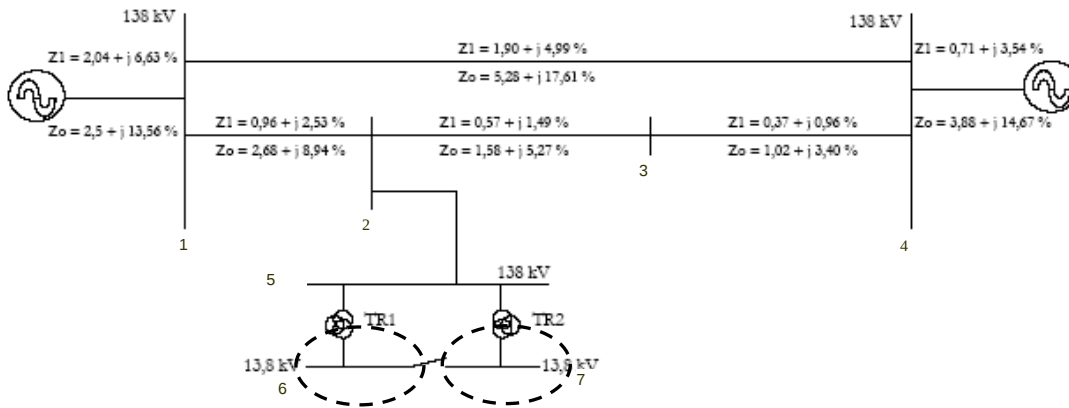


Formulação PLI

$$\min \sum_j y_{med,j}$$

s.a.

$$y_{red,i} = \sum_j M_{obs,i-j} \cdot y_{med,j} \geq 1, i = 1, \dots, n$$



Dados dos transformadores:

TR1 - $Z_{ps} = 9,33\%$ 138/13,8 kV base 15 MVA
 TR2 - $Z_{ps} = 8,97\%$ 138/13,8 kV base 15 MVA

Obs.: Os transformadores são Yo/Yo/D

Impedância mútua total (circuito duplo - 138kV):
 $Z_{om} = 3,36 + j 11,62\%$

VTCD em		1	2	3	4	5	6	7
$M_{obs} =$	defeito em 1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1	1
	6	0	0	0	0	0	1	0
	7	0	0	0	0	0	0	1

Modelo por AG

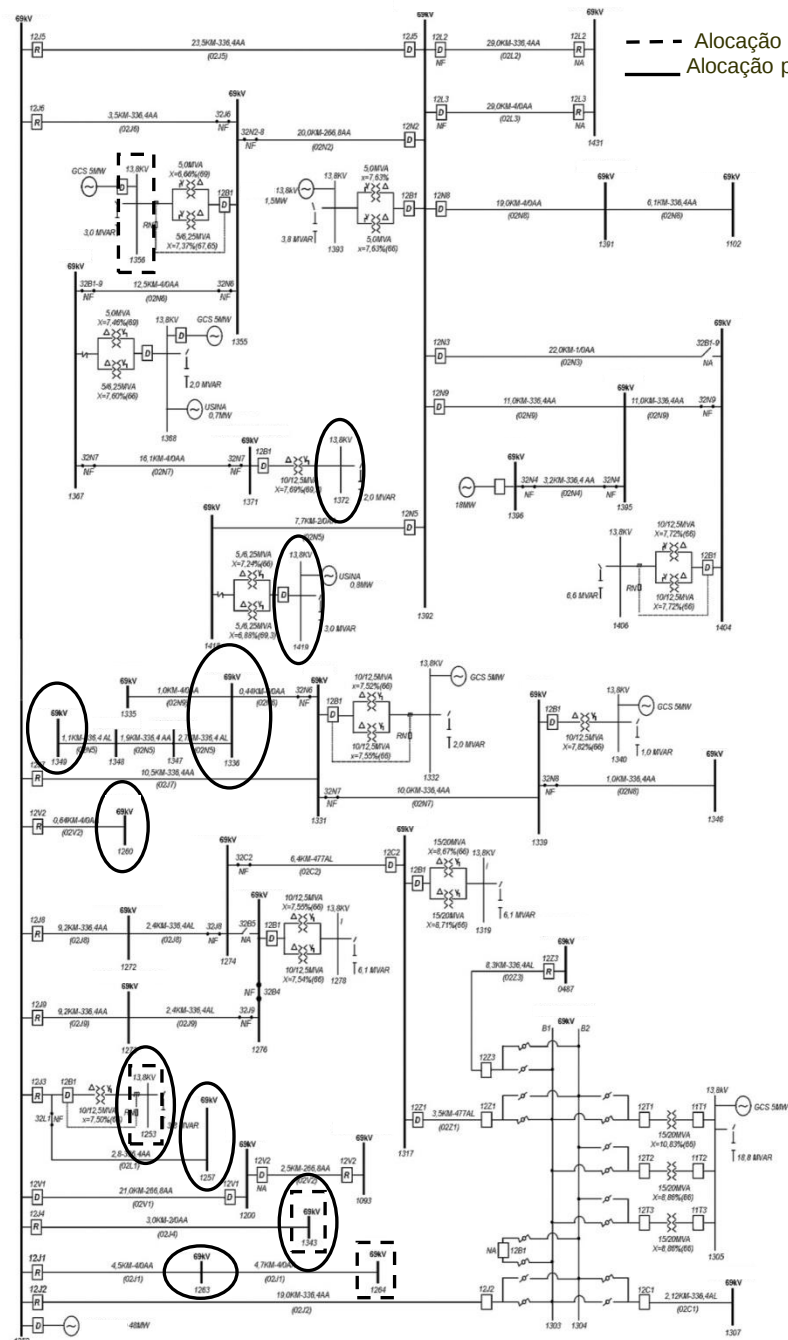
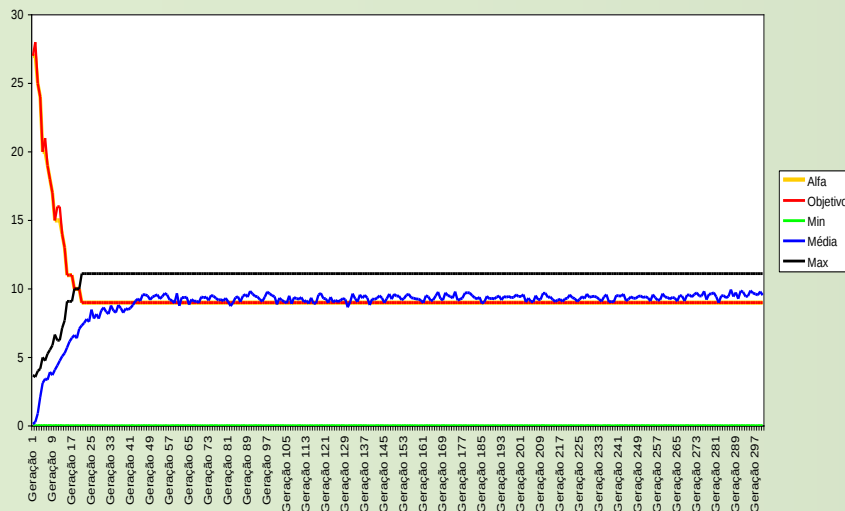
$$F_{aval} = \frac{1}{\sum_j y_{med,j} + kF_{pena}}$$

$$F_{pena} = \sum_i g(y_{red,i})$$

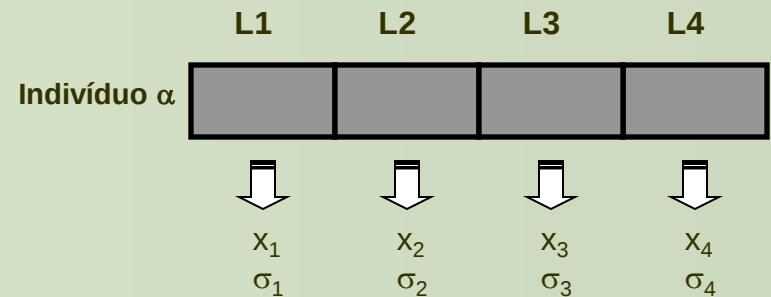
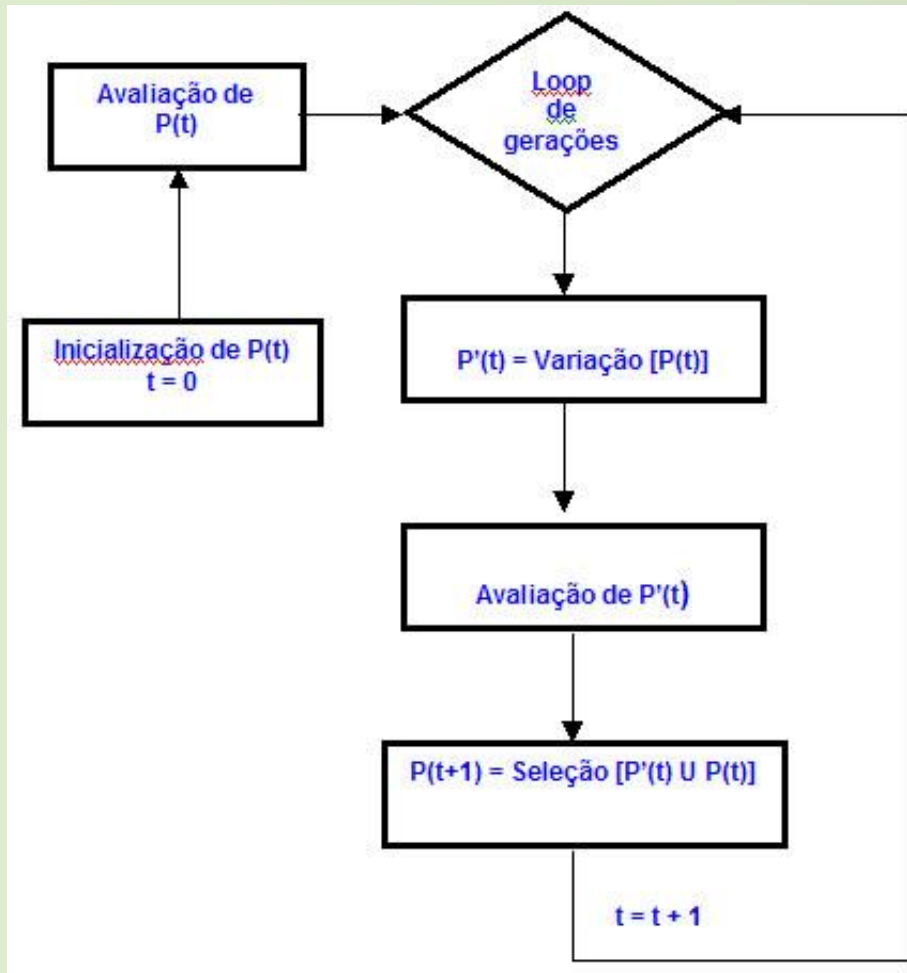
$$g(y_{red,i}) = 1, \text{ se } y_{red,i} = 0$$

$$g(y_{red,i}) = 0, \text{ se } y_{red,i} \geq 1$$

Evolução dos parâmetros

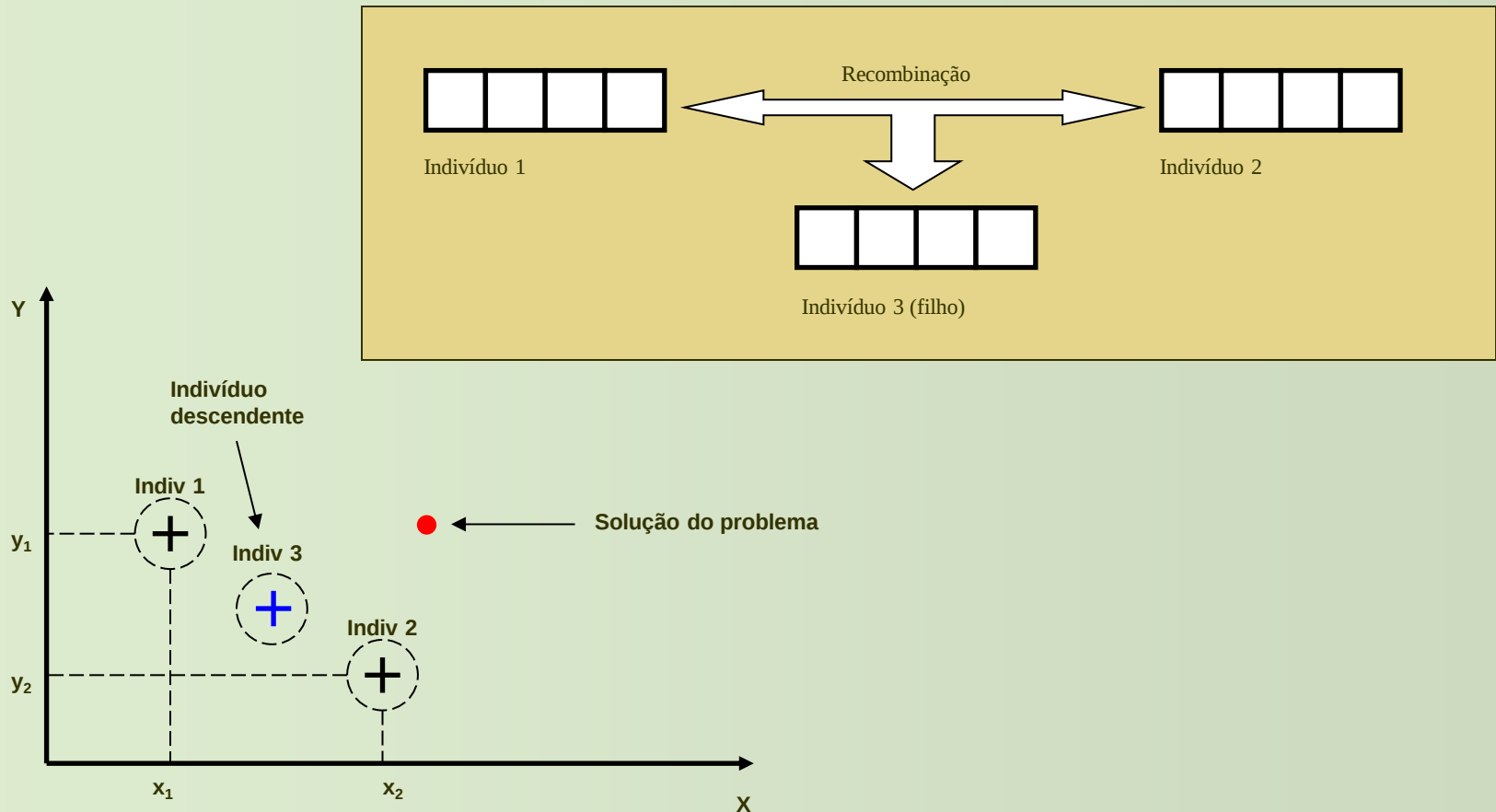


Estratégias evolutivas (EEs)



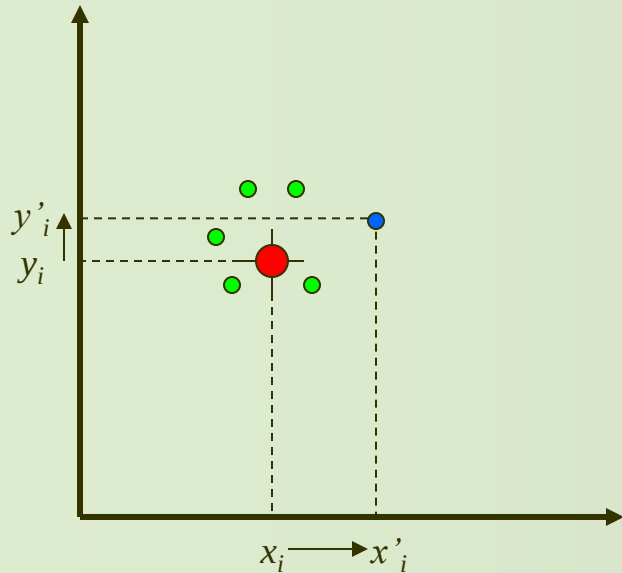
Variação da População em EE

Recombinação



Variação da População em EE

Mutação



$$x'_i = x_i + \sigma \cdot N_i(0,1)$$

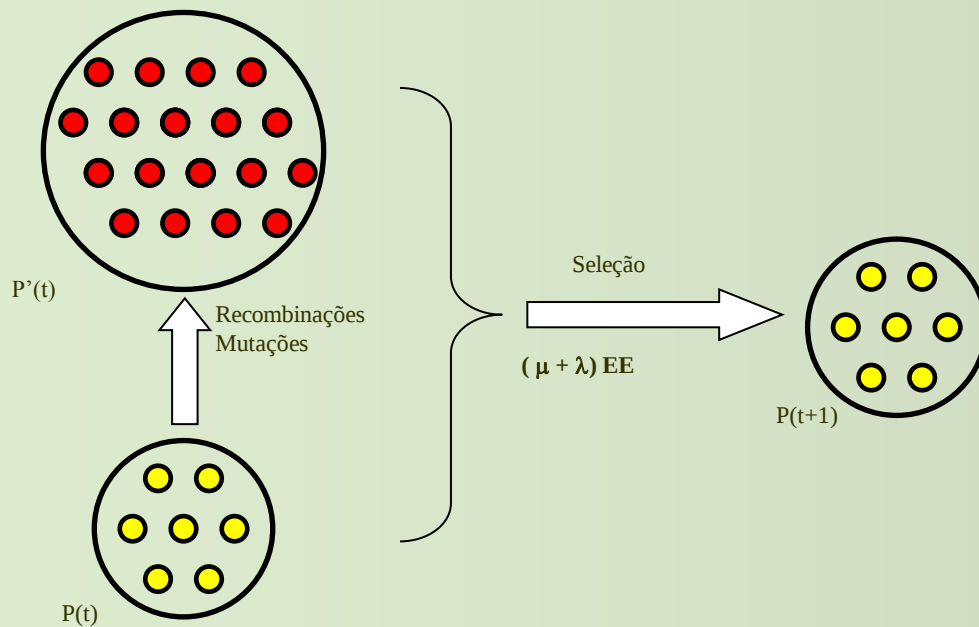
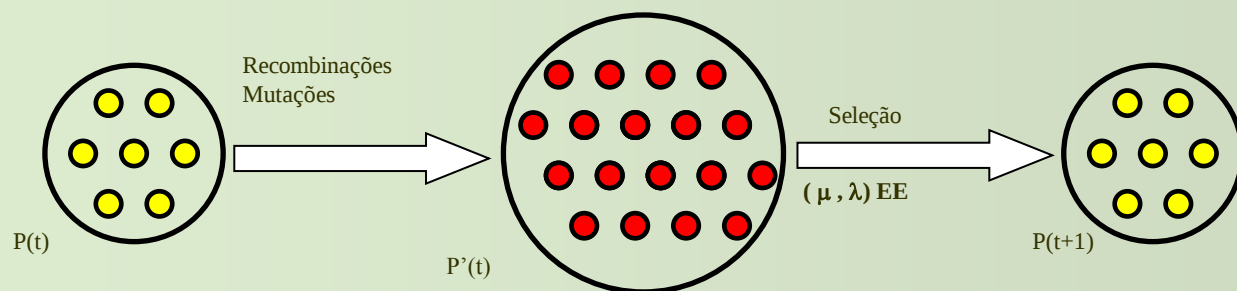
- Mutação com auto-adaptação

$$x'_i = x_i + \sigma'_i \cdot N_i(0,1)$$

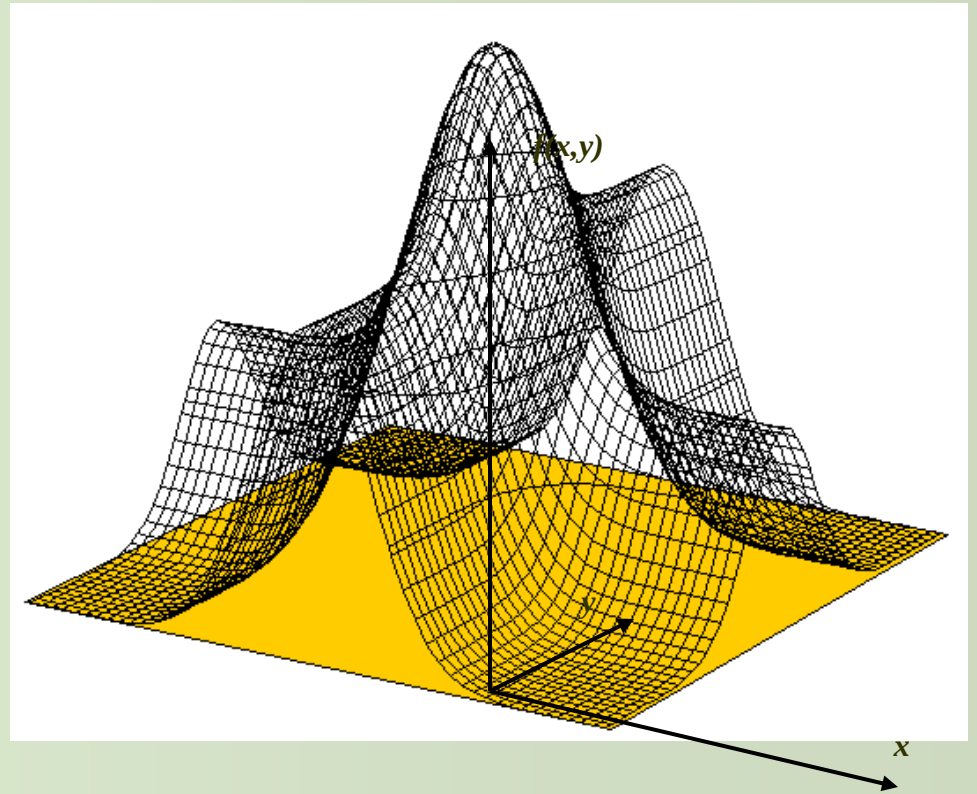
$$\sigma'_i = \sigma_i \cdot \exp(\tau' \cdot N(0,1) + \tau \cdot N_i(0,1))$$

τ', τ – taxas de aprendizado $\propto 1/\sqrt{2n}, 1/\sqrt{2\sqrt{n}}$

Seleção em EEs



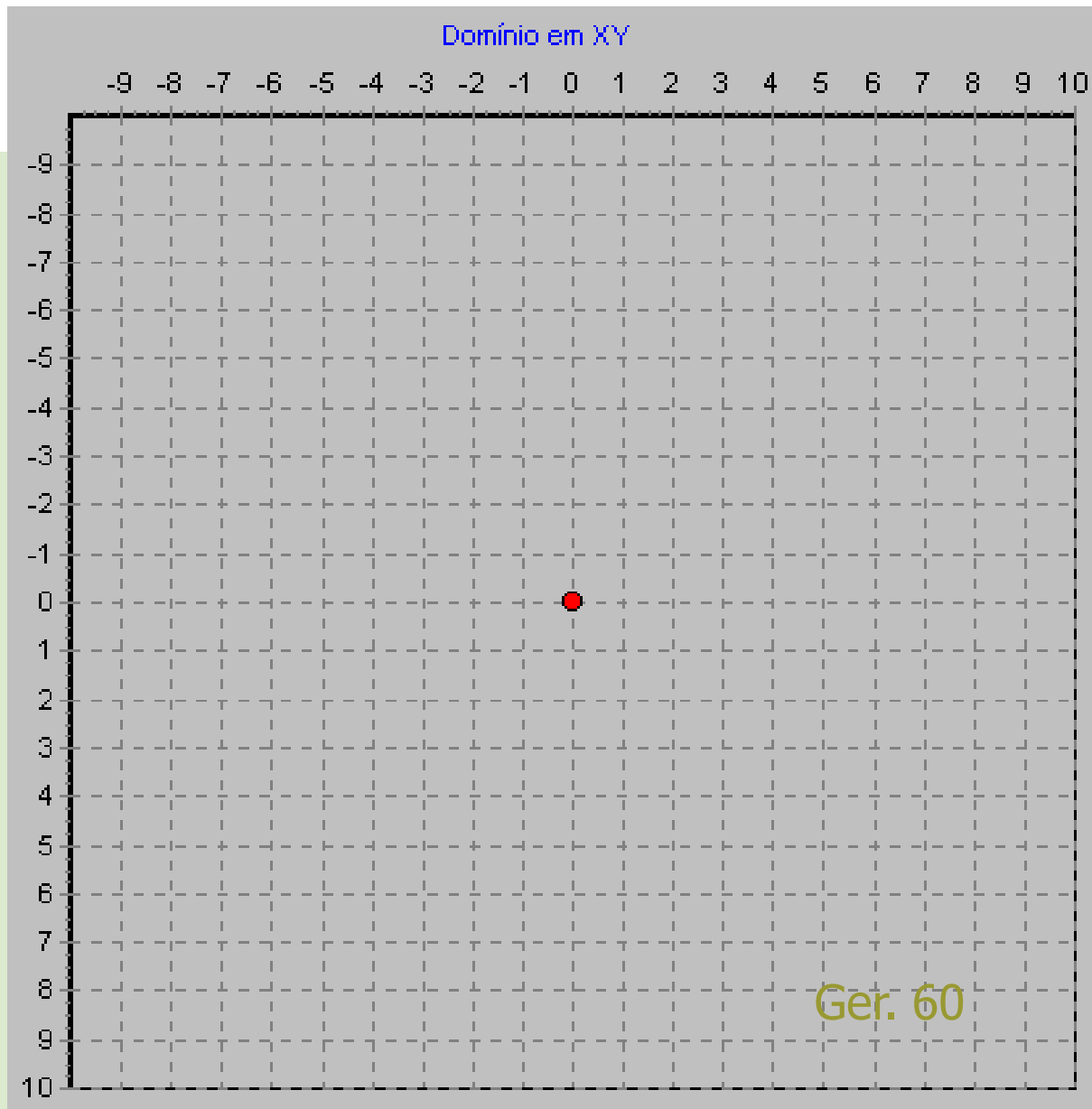
Exemplo de AE



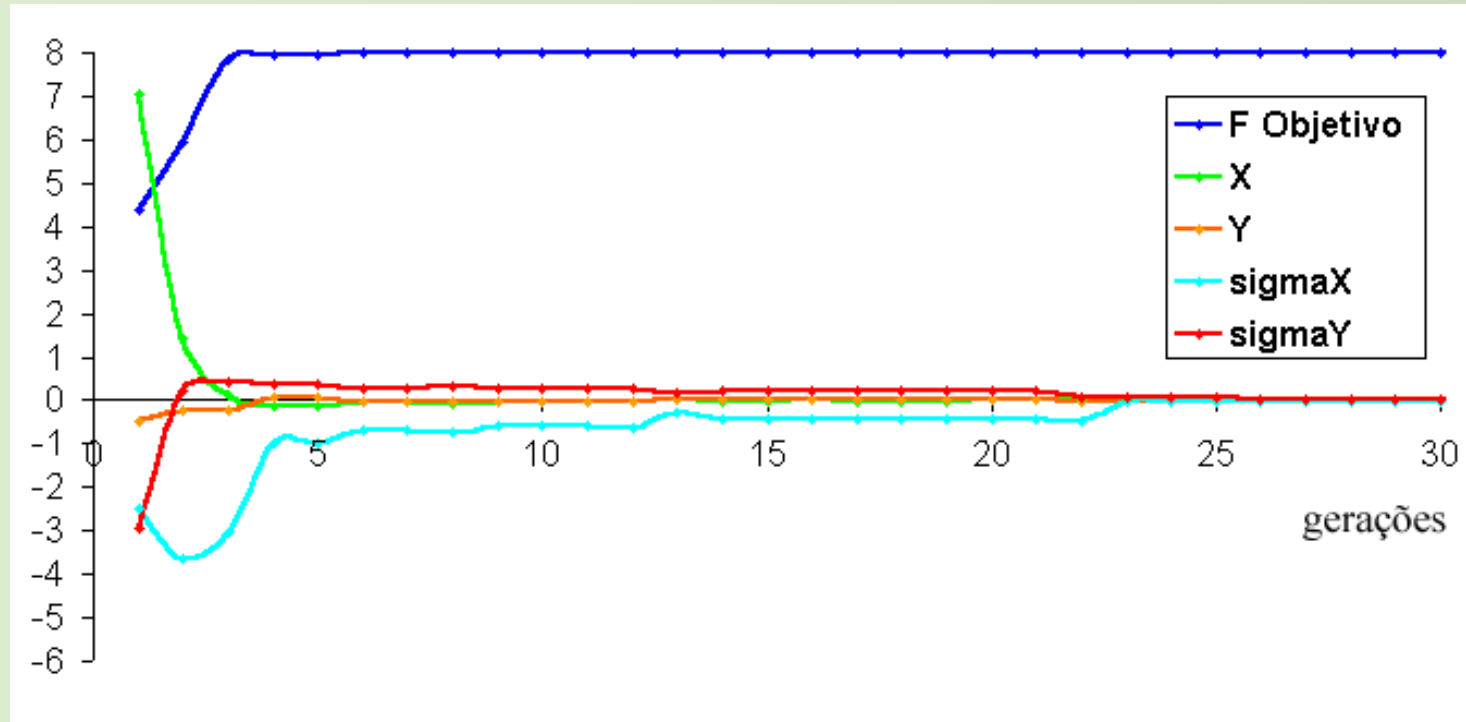
- Maximizar a função:

$$f(x,y) = 5 \cdot e^{(-y^2/2)} + 3 \cdot e^{(-x^2/2)}$$

Evolução - gerações



Evolução - gerações

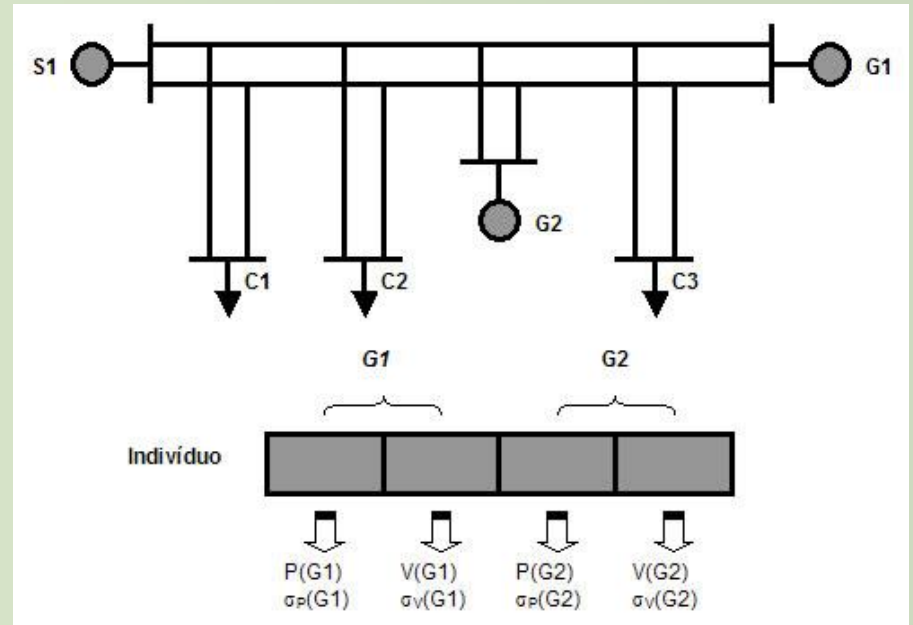


Algumas aplicações de AEs

- Otimização do despacho de unidades de geração distribuída (GD) e regulação da tensão
- Fluxo de potência convencional

Otimização do Despacho e Regulação de Tensão de GD

- Operação do sistema com mínimos custos operacionais
- Atendimento a critérios técnicos de carregamento e tensão na rede
- Ajuste nas unidades de geração distribuída:
 - Potência ativa
 - Nível de tensão



Modelo Matemático

PNL

$$\min f(\tilde{x}, \tilde{u})$$

s.a.

$$\tilde{g}(\tilde{x}, \tilde{u}) = 0$$

$$\tilde{x}_{\min} \leq \tilde{x} \leq \tilde{x}_{\max}$$

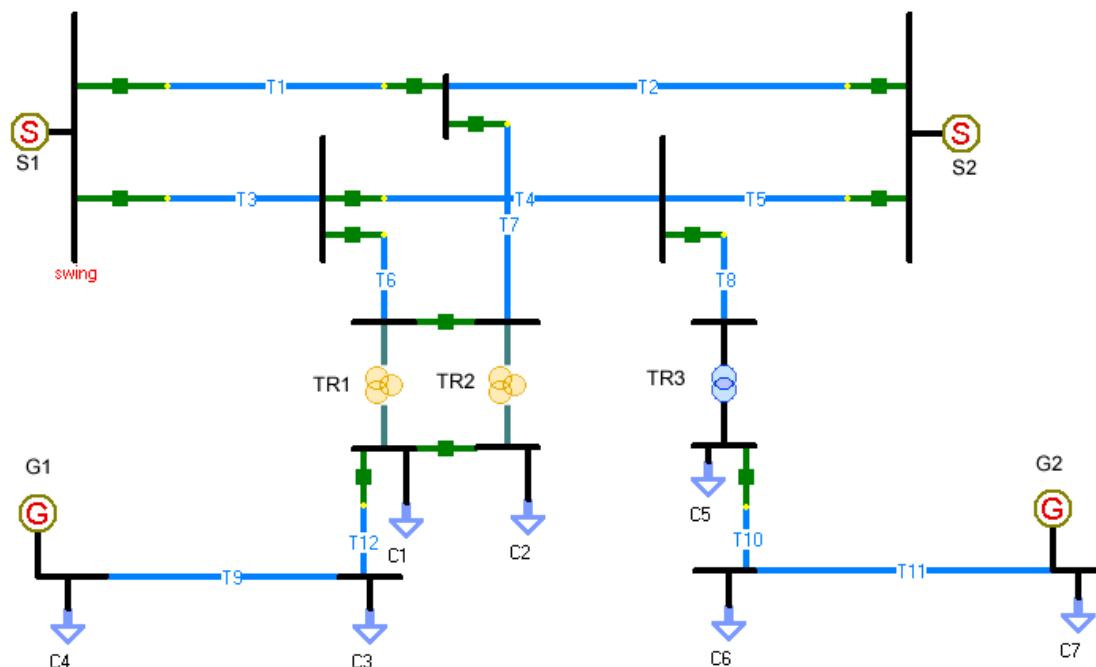
$$\tilde{u}_{\min} \leq \tilde{u} \leq \tilde{u}_{\max}$$

AE

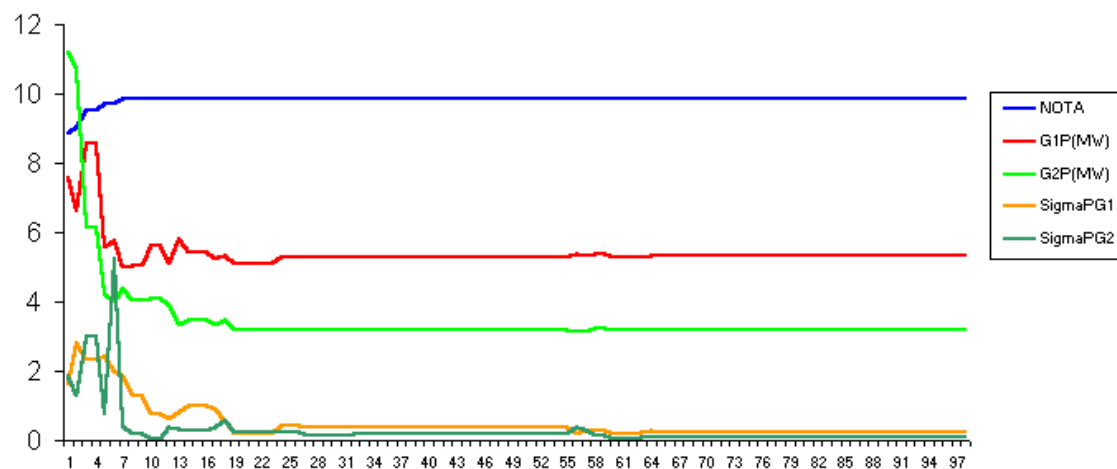
$$f(Indiv) = \frac{\alpha_C \cdot f_C(Indiv) + \alpha_T \cdot f_T(Indiv) + \alpha_P \cdot f_P(Indiv)}{\alpha_C + \alpha_T + \alpha_P}$$

- f_C – função de avaliação – transgressão carregamento
- f_T – função de avaliação – transgressão tensão
- f_P – função de avaliação – custo operacional (perdas)

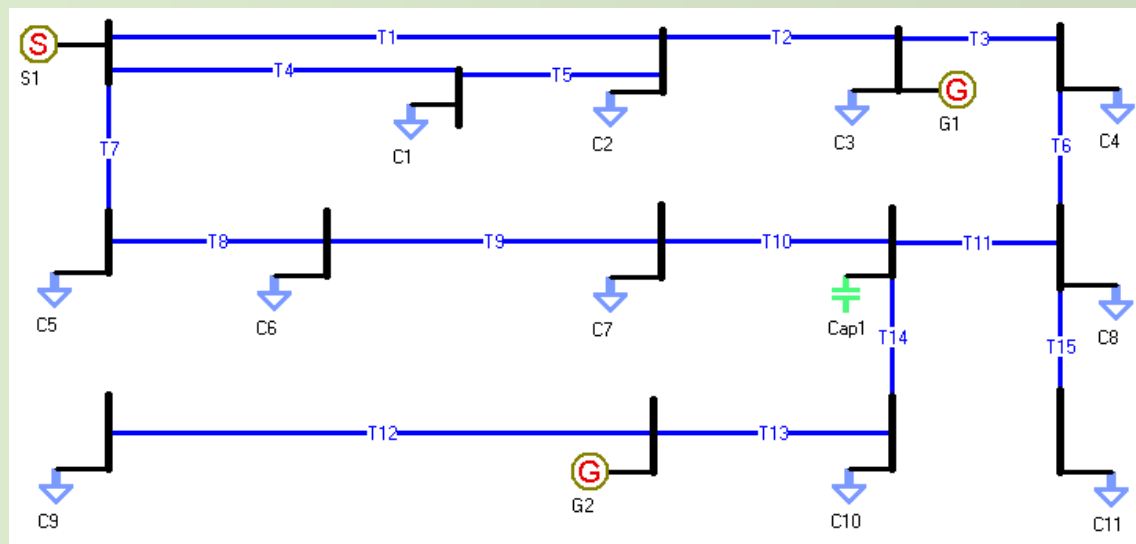
Resultados – Despacho GD - AE



Parâmetro	Valor
Gerações	200
Indivíduos/Geração	5
Lócus/Indivíduo	4
Prob. de Cruzamento	50%
Mutações/Indivíduo	10
Idade Máxima/Indivíduo	5 gerações
Tipo de seleção	(μ, k, λ)
α_C	1
α_T	1
α_P	3

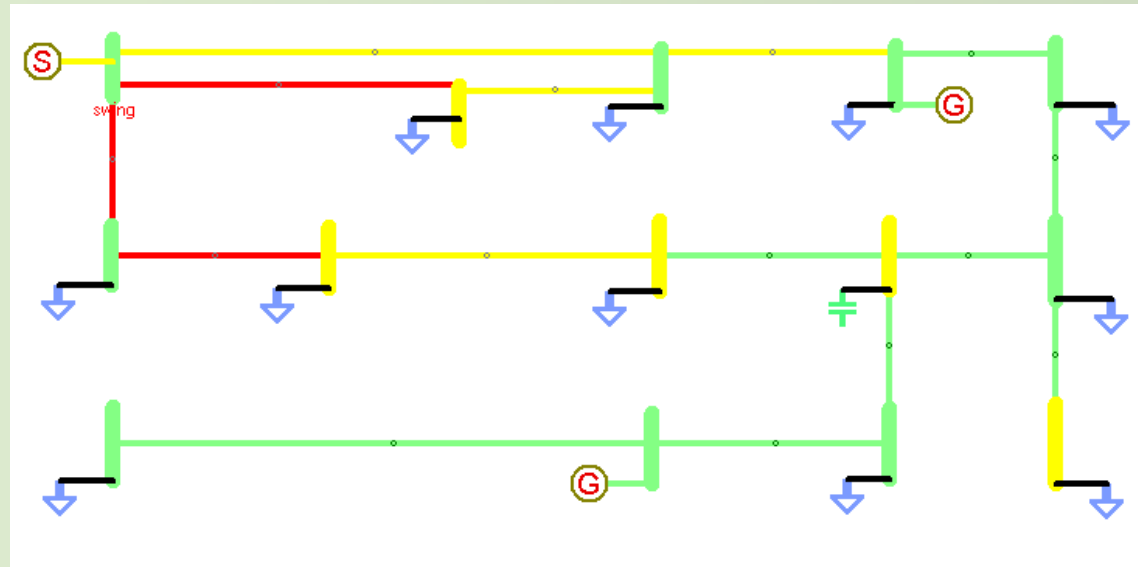


Caso 2



Suprimento/ Gerador	Tipo de barra	Capacidade (MVA)	Tensão Nominal (kV)
S1	V0	400	88
G1	PV	200	88
G2	PV	150	88

Diagnóstico

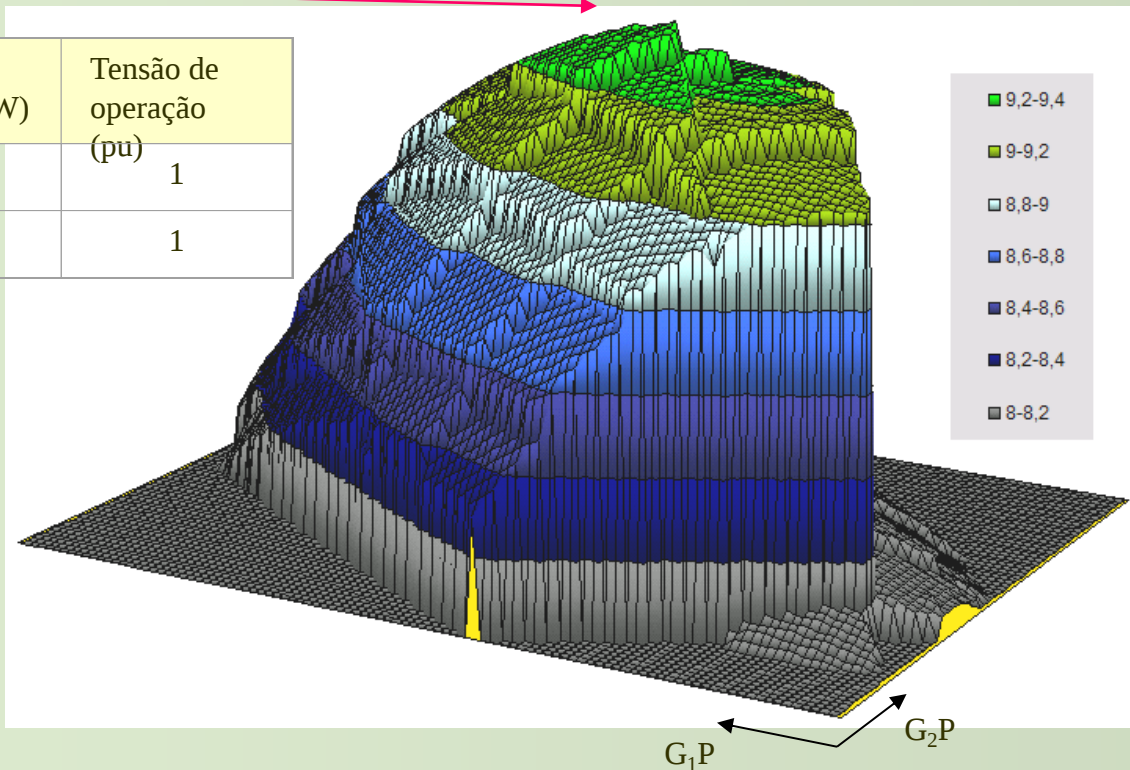


Gerador	Tipo de barra	Potência injetada (MW)	Tensão de operação (pu)
G1	PV	5	1
G2	PV	2	1

Busca exaustiva

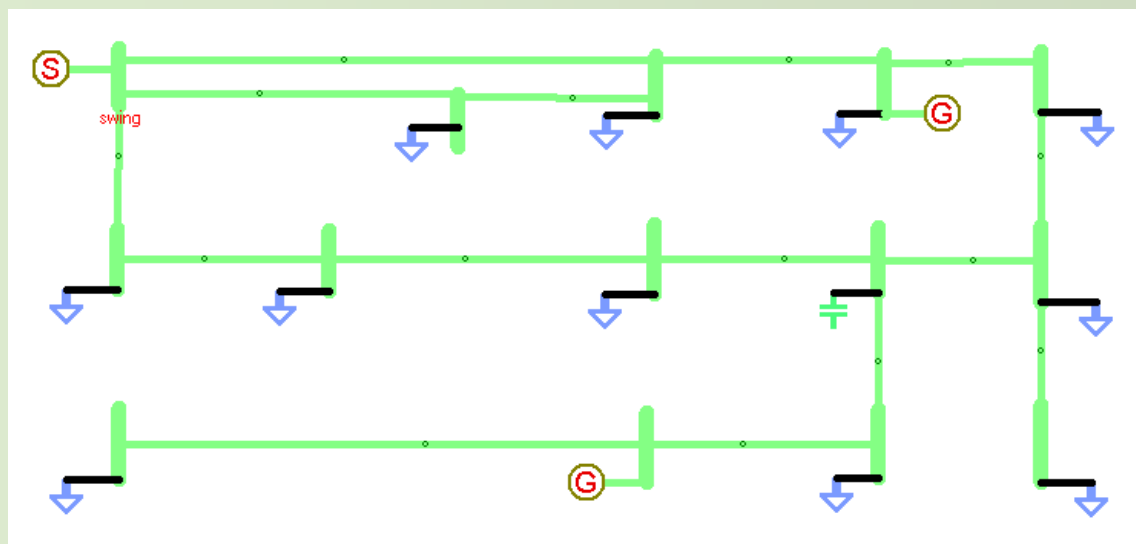
máximo

Gerador	Potência injetada (MW)	Tensão de operação (pu)
G1	128	1
G2	68	1



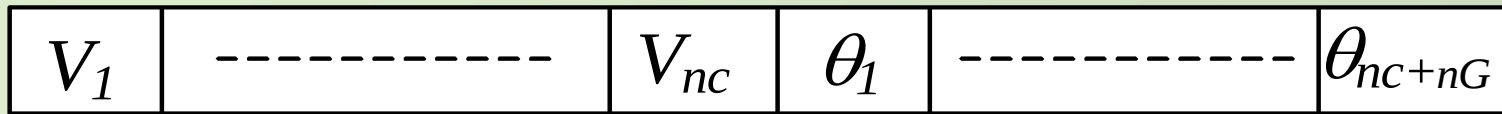
Representação gráfica da função g . Os valores de G_1P variam entre 0 e 200 MW, enquanto os de G_2P variam entre 0 e 150 MW.

Solução por AE

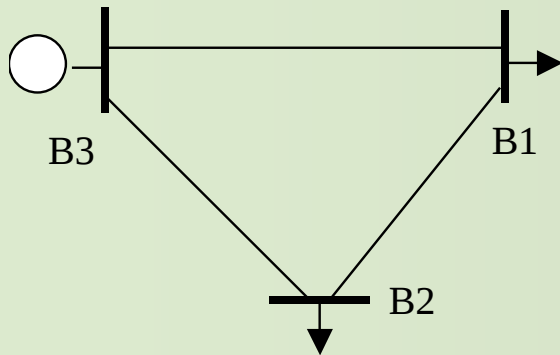


Gerador	Potência injetada (MW)	Passo de mutação (MW)	Tensão de operação (pu)	Passos de mutação (pu)
G1	125,34	0,31	1,02	0,00
G2	66,98	0,26	1,03	0,00

Fluxo de potência



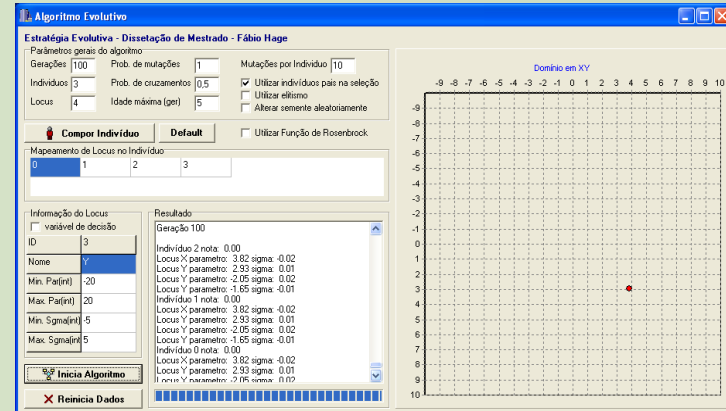
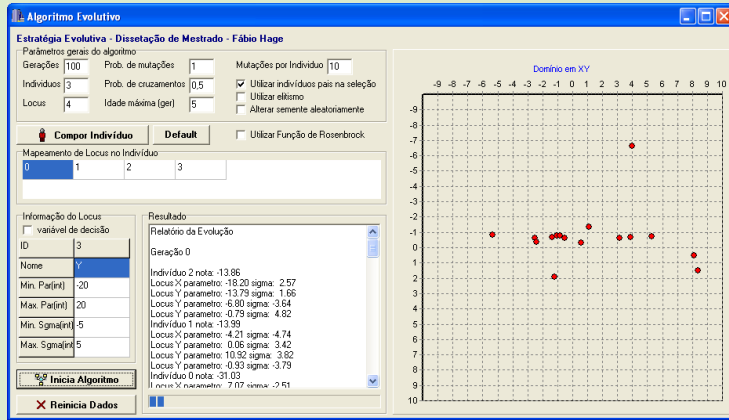
$$f(Indiv) = -[\sum_{i=1,nc+nG} |\Delta P_i| + \sum_{i=1,nc} |\Delta Q_i|]$$



$$P_i(V, \theta) = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ji} - B_{ij} \sin \theta_{ji}), \quad i = 1, \dots, n_c + n_G$$

$$Q_i(V, \theta) = -\sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ji} + B_{ij} \cos \theta_{ji}), \quad i = 1, \dots, n_c$$

Exemplo – fluxo de potência



Os valores das quedas de tensão nas barras 1 e 2 são de 3,82% e 2,93%, respectivamente, correspondendo às tensões de 0,9618pu e 0,9707pu. Os ângulos são de $-2,05^\circ$ e $-1,65^\circ$.

