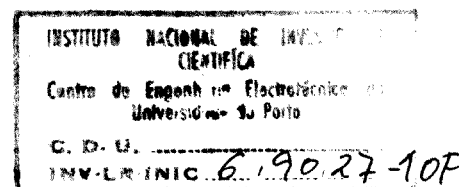
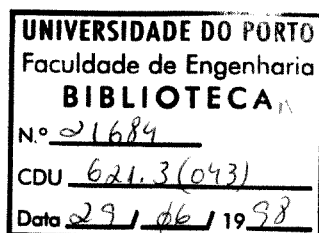


JOSÉ RUI DA ROCHA PINTO FERREIRA

**REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE
ELECTRICIDADE E GÁS**

**UMA ABORDAGEM UNIFICADA PARA
A CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA
DE ANÁLISE E APOIO À EXPLORAÇÃO**



FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

JANEIRO 1991

**Tese submetida para satisfação parcial
dos requisitos do programa de mestrado
em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores
(Sistemas de Energia)**

Tese realizada sob a supervisão do

Prof. Vladimiro Miranda

**Professor Associado do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
da
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**

Agradecimentos:

Desejo expressar os meus agradecimentos ao meu orientador Professor Doutor Vladimiro Miranda, pelo apoio e incentivo dados durante a realização do trabalho que originou esta tese, assim como na fase de escrita e revisão da dissertação.

Desejo expressar, igualmente, os meus agradecimentos ao Professor Doutor Manuel António C. Matos pelo apoio e incentivo dados durante a realização do trabalho.

Gostaria ainda de agradecer aos meus colegas Manuel Fernando Izidoro, Albino Simões Azevedo, José Nuno Fidalgo e José Manuel Magano pelo apoio que deram à realização deste trabalho, e aos meus colegas da secção de Física pela compreensão demonstrada aquando da distribuição de tarefas e serviço docente a cargo da secção.

Por fim gostaria de agradecer ao INESC o apoio prestado, quer facultando o acesso ao Curso de Especialização em Concepção e Simulação de Redes de Distribuição de Gás, ministrado no IST com o apoio da ITEC, quer pondo à disposição o material informático necessário e a colaboração de secretariado.

INDICE

1. INTRODUÇÃO E ÂMBITO DO TRABALHO	1.1
2. MODELOS MATEMÁTICOS PARA REDES DE GÁS E ELECTRICIDADE	2.1
2.1. Redes de gás em regime estacionário	2.1
2.2. Redes eléctricas em regime estacionário	2.8
2.3. Aspectos comuns e distintos	2.17
2.3.1. Formulação matemática como problemas de optimização	2.17
2.3.2. Topologia	2.20
3. CONCEPÇÃO DE INTERFACE GRÁFICA POLIVALENTE	3.1
3.1. Introdução	3.1
3.2. Ferramentas de construção (ATEGA+MAKEFONT)	3.3
3.3. Coordenação base de dados gráfica / base de dados características	3.5
4. DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE GRÁFICA	4.1
4.1. ERG - Uma Proposta	4.1
4.2. GRADES + EXPLOR - uma realização	4.17
5. CONCLUSÕES	5.1

ANEXOS

EQUAÇÕES DE ESCOAMENTO DE FLUIDOS EM CANALIZAÇÕES	A1.2
MÉTODOS DE RESOLUÇÃO DE FLUXOS ESTACIONÁRIOS DE GÁS EM REDES	A2.2

MÉTODOS DE CÁLCULO DE TRÂNSITOS DE POTÊNCIA EM REDES ELÉCTRICAS

A3.2

ALGORITMO PARA O CÁLCULO DE TRÂNSITOS DE POTÊNCIA E CURTO-CIRCUITOS EM REDES ELÉCTRICAS RADIAIS

A4.2

BIBLIOGRAFIA

B.1

1. INTRODUÇÃO E ÂMBITO DO TRABALHO

A conjuntura económica na década de 50 levou a que fossem construídos grandes empreendimentos hidroeléctricos. Para os viabilizar foi necessário criar incentivos ao consumo de energia eléctrica. Devido a condições orográficas a localização dos centros produtores ficou predominantemente no Norte, para a viabilização desses empreendimentos o preço da energia foi substancialmente reduzido nessa zona relativamente ao resto do país.

O crescimento da indústria obrigou ao aumento do consumo o que levou a que se passasse de uma situação de abundância para uma situação deficitária, sendo, então, necessário na década de 70 recorrer a centrais térmicas, acabando mesmo pela produção nestas ser superior à das hídricas.

A crise que seguidamente se gerou no que respeita à matéria prima para as centrais térmicas (crise do petróleo) mais acentuada ainda no momento presente, levou a que surgisse o inevitável aumento do preço da energia. Esta situação obrigou a repensar todo o sistema de produção e distribuição de energia, aparecendo, como alternativa viável, a distribuição de gás combustível. Esta fonte de energia seria utilizada, como forma de energia final para aquecimento, deixando a iluminação, a força motriz, e outros para a energia eléctrica. O gás além de poder apresentar um preço do kWh inferior ao do kWh eléctrico, apresenta ainda, segundo dados publicados, um índice de sinistralidade inferior à energia eléctrica.

A prevista instalação de redes de distribuição de gás natural em Portugal conduz à necessidade de formação de ciência e tecnologia nacional nesta matéria.

Dado o conhecido e cientificamente profundo e detalhado tratamento computacional das redes eléctricas foi motivo de inspiração para esta dissertação a tentativa de implementar um tratamento semelhante para as redes de gás. Tal motivou uma ideia ainda mais alargada, que consistia em pensar numa generalização a nível de redes de modo a se obter um vasto conhecimento da topologia geral das redes e à determinação de um modelo formal genérico para cálculo de fluxos em redes, fossem elas de gás, de electricidade, de águas ou de qualquer outro tipo.

Tal ideia serviu de suporte para a realização desta dissertação e do trabalho a ela ligado, se bem que só se tenha focado o estudo conjunto de dois tipos de rede, a eléctrica e a de gás. No trabalho realizado desenvolveu-se uma ferramenta universal, devido à diversidade de esquemas que poderiam vir a surgir (redes de energia, redes de gás, redes de água, ...), sendo para tal criados diversos módulos que se podem vir a juntar de modo a obter um produto final.

A estrutura da dissertação deve-se essencialmente à forma como o trabalho foi definido, pelo que se remete para anexos a descrição de alguns algoritmos usados quer para as redes de gás, quer para as redes eléctricas.

Assim, o capítulo 1 é composto pela presente descrição.

No capítulo 2 encontra-se a descrição dos modelos matemáticos para as redes de gás e electricidade. O primeiro ponto deste capítulo descreve o modelo matemático para análise de redes de gás em regime estacionário, deixando-se para os anexos 1 e 2 a descrição da equação de escoamento de fluídos em canalizações e os métodos de resolução de fluxos estacionários de gás em redes.

No segundo ponto é apresentado o modelo matemático para redes eléctricas, referindo-se o método de Newton-Raphson como método de cálculo por ser o mais vulgarmente utilizado. Outros métodos de cálculo, são abordados no anexo 3 encontrando-se no anexo 4 um método estritamente dedicado a redes radiais.

No último ponto do capítulo 2, faz-se a análise comparativa dos modelos matemáticos para gás e electricidade, focando-se alguns pontos comuns e distintos dos dois.

O capítulo 3 é composto, essencialmente, pela descrição de uma interface gráfica, para desenho, arquivo e tratamento de redes, encontrando-se dividido em três subcapítulos. No primeiro deles, é feita a introdução, descrevendo-se as premissas de que se deve partir para a realização de uma interface gráfica. É feita também uma análise do modo como um produto pode ser bem aceite ou não pelos futuros utilizadores, dependendo da interface com o utilizador.

O segundo subcapítulo refere as ferramentas de que se partiu para a elaboração da interface gráfica, fazendo-se uma descrição mais ou menos pormenorizada de cada módulo. É ainda focado o programa que, baseado nestas ferramentas, permite a construção de fontes de caracteres.

No terceiro subcapítulo foca-se a maneira como poderá ser construída a base de dados, e a coordenação entre os dados gráficos e os dados relativos a características de componentes. Neste ponto são descritas duas possibilidades de construção da base de dados, dependendo a opção da complexidade do problema a tratar.

No capítulo 4 faz-se referência a dois programas relativamente diferentes quanto à sua complexidade. O primeiro é relativo às redes de gás. Aqui são descritas as especificações de que se partiu para o realizar. Também se faz referência ao método usado no cálculo das pressões e fluxos, e é realizada uma análise dos tempos de cálculo obtidos pelo método utilizado, recorrendo ao uso de técnicas de tratamento de esparsidade.

No final do capítulo descreve-se um trabalho realizado para a EDP com o apoio do INESC, o qual tem uma interface gráfica em tudo semelhante à do problema das redes de

gás, e no qual foram aplicadas todas as ferramentas desenvolvidas. É ainda de focar que este programa está dividido em duas partes distintas que operam sobre a mesma base de dados.

Por fim, referira-se o quinto e último capítulo, no qual se tecem alguns comentários e conclusões ao trabalho realizado.

2. MODELOS MATEMÁTICOS PARA REDES DE GÁS E ELECTRICIDADE

2.1. Redes de gás em regime estacionário [1,2,3,4]

A equação geral que descreve o escoamento em condutas de gás pode ser escrita como

$$Q_{12} = \sqrt{\frac{\pi^2 R_{ar}}{64}} \frac{T_n}{p_n} \sqrt{\frac{\left\{ (p_1 - p_2)^2 - \frac{2p_m^2 Sgh}{zR_{ar}T} \right\} D^5}{fSLTz}} \quad (2.1)$$

Os passos que conduzem à equação 2.1 estão descritos no anexo 1.

Para condutas horizontais ($h=0$) a equação 2.1 torna-se mais simples

$$Q_{12} = \sqrt{\frac{\pi^2 R_{ar}}{64}} \frac{T_n}{p_n} \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)^2 D^5}{fSLTz}} \quad (2.2)$$

Observando as equações 2.1 e 2.2, nota-se que há um termo que ainda não está quantificado: o termo f : f representa o factor de atrito e depende quer da pressão quer do fluxo (anexo 1). Normalmente, a valores baixos de pressão correspondem valores também baixos de caudal, ao passo que às altas pressões estão associados grandes caudais. Nos caudais baixos podemos dizer que o escoamento é laminar, enquanto que os grandes caudais são totalmente turbulentos. A grande maioria dos sistemas trabalha numa zona de turbulência parcial.

Na região laminar, o factor de atrito é função do número de Reynolds e é definido pela relação de Hagen-Poiseuille

$$f = \frac{16}{Re}$$

Substituindo f em 2.1 obtém-se a equação de Hagen-Poiseuille.

Consoante o escoamento é total ou parcialmente turbulento, podemos definir o factor de atrito como

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 4 \log \left(3.7 \frac{D}{K} \right) \quad \text{totalmente turbulento}$$

ou

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 4 \log \text{Re} \sqrt{f} - 0.6 \quad \text{parcialmente turbulento}$$

onde

K é a rugosidade efectiva

D é o diâmetro interno.

Nestes casos, f não depende apenas do número de Reynolds, mas também da rugosidade das paredes da conduta. Nota-se que quanto mais turbulento for o escoamento, mais o factor de atrito depende da rugosidade e menos do número de Reynolds.

Outro ponto a ter em atenção ao considerar o factor de atrito, é que poderá haver perdas não só devido à viscosidade do do fluido mas também devido a outros factores, como por exemplo: envelhecimento da conduta, juntas e ligações, etc. Estas perdas deverão também ser contabilizadas de modo que os valores reais dos caudais e pressões não sejam diferentes dos valores obtidos pelo uso das equações. Assim devemos entrar, não com o valor absoluto da rugosidade, mas com o valor efectivo que traduz todas as perdas.

Conforme o escoamento é laminar ou turbulento as quedas de pressão podem ser menos ou mais importantes. Estudos feitos revelam que no caso do escoamento laminar não será de entrar com qualquer factor, visto que a perda de carga não é significativa.

O factor arbitrado para traduzir todas as perdas que não sejam provocadas pela viscosidade é a eficiência da conduta (E), que varia normalmente entre os valores 0.8 e 1.

Podemos então escrever

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = E \sqrt{\frac{1}{f_t}}$$

onde:

 f é o valor real do factor de atrito f_t é o valor teórico do factor de atrito.

Substituindo em 2.1 e 2.2 obtém-se

$$Q_{12} = \sqrt{\frac{\pi^2 R_{ar}}{64}} E \frac{T_n}{P_n} \sqrt{\frac{\left\{ \left[(p_1 - p_2)^2 - \frac{2p_m^2 Sgh}{zR_{ar}T} \right] D^5 \right\}}{f_t SLTz}}$$

e

$$Q_{12} = \sqrt{\frac{\pi^2 R_{ar}}{64}} E \frac{T_n}{P_n} \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)^2 D^5}{f_t SLTz}}$$

Das equações acima conclui-se que o caudal decresce quando o factor de eficiência também decresce.

Vimos atrás que substituindo $f = \frac{16}{Re}$ em 2.1 se obtinha a equação de Hagen-Poiseuille.

Iremos agora fazer referência a algumas outras equações para o escoamento.

Para pressões relativas entre 0 e 75 mbar:

$$f = 0.0044 \left(1 + \frac{12}{0.276 D} \right)$$

e substituindo em 2.1 obtém-se a equação de Lacey.

O valor de f pode ainda ser considerado constante e igual a 0.0065 o que substituído em 2.1 dá a equação de Pole.

Para média pressão, estando as redes a funcionar entre os 0.75 e os 7 bar de pressão relativa

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 5.338 (Re)^{0.076} E$$

sendo

$$Re = D \frac{v\rho}{\mu}$$

e

$$Q = \frac{\pi D^2}{4}$$

donde

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

e

$$Re = \frac{4Qp}{\mu D \pi}$$

Substituindo em 2.1 obtém-se a equação de Polyflo.

Finalmente para redes operando em alta pressão, ou seja, pressões relativas superiores a 7 bar temos

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 6.872 (Re)^{0.073} E$$

Substituindo em 2.1 obtém-se a equação de Panhandle.

Após termos descrito as equações gerais que regem o escoamento em condutas circulares, estamos em condições de poder formular os dois métodos para a determinação dos caudais nas condutas e pressões nos nós numa rede.

Se a rede for radial, o problema de cálculo é directo, sendo possível o cálculo dos caudais e pressões com recurso a meios pouco exigentes.

Caso as redes sejam malhadas já o cálculo dos caudais e pressões se torna bastante complexo, sendo necessário o recurso a meios computacionais e a algoritmos de cálculo mais ou menos sofisticados.

Comecemos então por definir a equação de escoamento de forma generalizada. Assim

$$\phi [(Q_{ij})_k] = K_K (Q_{ij}^{m1})_K$$

onde:

$\phi [(Q_{ij})_k]$ é a função do fluxo entre os nós i e j do ramo k

K_K é a constante para a conduta k

$(Q_{ij})_K$ é o fluxo entre os nós i e j do ramo K

m1 é o expoente do fluxo para baixa, média e alta pressão.

Como

$$\phi [(Q_{ij})_k] = K_K (Q_{ij}^{m1})_K = P_i - P_j = (\Delta P_{ij})$$

em que

P_i é o quadrado da pressão no nó i

P_j é o quadrado da pressão no nó j,

resolvendo em ordem a Q_{ij} obtém-se

$$(\Delta P_{ij}) = (Q_{ij})_K = \left(\frac{\Delta P_{ij}}{K_K} \right)^{\frac{1}{m_1}} \quad (2.3)$$

Teremos que atender ao facto de o fluxo poder mudar de sentido na conduta k pelo que

$$(Q_{ij})_K = S_{ij} \left(\frac{S_{ij} (P_i - P_j)}{K_K} \right)^{\frac{1}{m_1}} \quad (2.4)$$

onde

$$\begin{aligned} S_{ij} &= 1 && \text{se } P_i > P_j \\ S_{ij} &= -1 && \text{se } P_i < P_j \end{aligned}$$

As duas formulações possíveis estão ligadas às duas leis de Kirchhoff.

Definição:

lei: a soma algébrica dos fluxos em cada nó é nula;

lei: a queda de pressão numa malha fechada é nula.

Baseando-nos na primeira lei de Kirchhoff, a equação genérica para os nós vem:

$$L = A Q \quad (2.5)$$

sendo:

L o vector das cargas nos nós de dimensão n

n = número total de nós -1

Q o vector dos fluxos nos ramos de dimensão m

m = número total de ramos

A a matriz de incidência ramo-nó. Matriz rectangular com o número de linhas igual ao número de nós e o número de colunas igual ao número de ramos. O elemento a_{ij} da linha i coluna j da matriz A corresponde ao nó i ramo j e é definido como:

$$a_{ij} = \begin{cases} +1 & \text{ramo } j \text{ entra no nó } i \\ -1 & \text{ramo } j \text{ sai do nó } i \\ 0 & \text{ramo } j \text{ não ligado ao nó } i \end{cases}$$

As quedas de pressão nos ramos (P) está relacionada com as pressões nos nós pela expressão:

$$\Delta P = -A^T P \quad (2.6)$$

onde

ΔP é o vector das quedas de pressão nos ramos, de dimensão m

P é o vector das pressões nos nós de dimensão n

A^T é a transposta da matriz de incidência ramo-nó

Da equação 2.3

$$Q = \phi' (\Delta P)$$

e substituindo ΔP pela equação teremos

$$Q = \phi' (-A^T P)$$

e de 2.5

$$L = A [\phi' (-A^T P)] \quad (2.7)$$

Resolvendo a equação 2.7 por um método iterativo, devido à não linearidade das equações, obtém-se as pressões nos nós.

Seguindo a segunda lei de Kirchhoff podemos escrever que

$$B \Delta P = 0 \quad (2.8)$$

onde

B é a matriz de incidência ramo-malha

ΔP é o vector das quedas de pressão nos ramos, de dimensão m

vector nulo de dimensão k

k = número de malhas independentes.

Da equação $\phi (Q_{ij}) = \Delta P_{ij}$ vem

$$\Delta P = \phi (Q)$$

onde

Q) é o vector de funções de caudal, de dimensão m .

Substituindo ΔP em 2.8 vem

$$B [\phi(Q)] = 0 \quad (2.9)$$

Resolvendo a equação 2.9 por um método iterativo, obtém-se os valores dos fluxos nos ramos.

2.2. Redes eléctricas em regime estacionário [7,8,9,10]

Na análise de trânsitos de potência em redes eléctricas, fazem-se certas aproximações, com vista a ser possível modelizar o sistema e permitir construir algoritmos de cálculo eficientes e que permitam a análise em tempo real.

Assim, a rede eléctrica é considerada fixa, linear e equilibrada e é representada por esquemas equivalentes de parâmetros constantes. É possível, então, escrever um conjunto de equações complexas e lineares que relacionam correntes e tensões. Se o conjunto de equações é linear, poder-se-ia pensar que o sistema era de resolução directa. Tal não se verifica, atendendo ao facto que existem não-linearidades na modelização dos barramentos (nós). Vejamos, então, quais os dados de que se parte e quais os resultados que se pretende obter.

Os dados mínimos para a resolução de um fluxo de cargas são:

- Impedâncias de todos os elementos que constituem a rede
- Potências activa e reactiva produzidas em todos os barramentos excepto no barramento que iremos usar como barramento de referência (nó fonte)
- Potências activas consumidas em todos os barramentos
- Potências reactivas produzidas em determinados barramentos, que denominaremos por barramentos PQ
- Potências reactivas consumidas em todos os barramentos
- Amplitude da tensão no barramento de referência e nos barramentos que não sejam classificados como PQ (barramentos PV).

Os barramentos PV são nós em que é especificada a potência activa (produzida e consumida) e o módulo da tensão. Todos os outros barramentos, exceptuando o de referência, são barramentos PQ que tal como se viu atrás têm especificados os valores de potência activa e reactiva (produzida e consumida).

Com estes dados pretende-se calcular os seguintes valores:

- Amplitude e argumento das tensões em todos os barramentos
- Potência produzida e consumida em todos os barramentos
- Correntes nas linhas
- Perdas totais.

Para a resolução do problema de cálculo de tensões e fluxos podemos partir de qualquer uma das duas leis de Kirchhoff. No entanto, para o caso das redes eléctricas, é vantajoso efectuar a formulação do problema com base na 1ª lei (lei dos nós). Este facto deve-se a que o número de equações é geralmente menor quando comparado com o que surgiria se se adoptasse a lei das malhas. A introdução de um ramo não aumenta o número de

equações e o algoritmo de cálculo é muito mais eficiente, uma vez que não é necessário definir todas as malhas do sistema.

Sendo assim, e designando por E_k e E_i as tensões nos barramentos k e i , e por y_{ik} ($=y_{ki}$) a admitância do ramo que os une, a corrente que transita no ramo de k para i pode ser escrita como

$$I_{ki} = y_{ki} (E_k - E_i) \quad (2.10)$$

Considerando os barramentos da rede numerados de 0 a n , sendo 0 o barramento de referência (terra) e a partir da 1ª lei de Kirchhoff temos

$$I_k = \sum_{i=0}^n I_{ki} = \sum_{i=0}^n y_{ki} (E_k - E_i) \quad (2.11)$$

Uma vez que $E_0=0$ e porque o sistema é linear

$$I_k = \sum_{i=0 \neq k}^n y_{ki} E_k - \sum_{i=0 \neq k}^n y_{ki} E_i \quad (2.12)$$

Escrevendo 2.12 para todos os barramentos excepto o de referência (terra) obtemos

$$I = Y E \quad (2.13)$$

em que

Y é a matriz das admitâncias, que possui as seguintes propriedades:

- Simétrica
- Quadrada
- Complexa
- Esparsa

Uma vantagem deste método é que a matriz Y é de fácil construção. A partir de 2.12 verifica-se que os valores de Y são obtidos do seguinte modo:

$$Y_{kk} = y_{k0} + \sum_{i=1 \neq k}^n y_{ki} \text{ - admitância própria do nó } k$$

$$Y_{ki} = -y_{ki} = -y_{ik} \text{ - admitância entre o nó } k \text{ e o nó } i$$

No entanto o sistema representado pela equação 2.13 poderá ou não ter solução, visto que a equação

$$E = Y^{-1} I \quad (2.15)$$

só tem solução se Y^{-1} existir.

A partir dos valores calculados para a matriz Y (2.14), verifica-se que a matriz só é invertível se existirem valores y_{k0} (admitância entre um nó k e a terra), caso contrário a soma de cada coluna da matriz é nula e como tal o determinante associado também o é, pelo que ela não é passível de ser invertida. No entanto, os valores de y_{k0} quando existem, são normalmente muito pequenos, pelo que tornam o determinante muito próximo de zero o que traz grandes problemas numéricos à inversão da matriz. É por este motivo que definimos um novo barramento de referência que corresponde a uma das fontes do sistema. Neste barramento a tensão é pré-definida em módulo e fase, e considera-se que a potência necessária a satisfazer as perdas nas linhas do sistema é fornecida por ele, daí designá-lo também por barramento de compensação. Sendo assim, o sistema passa a ter solução unívoca, podendo-se então escrever

$$I_k - Y_{k1} E_1 = \sum_{i=2}^n Y_{ki} E_i \quad (2.16)$$

Até aqui, o sistema não possui não linearidades pelo que seria admissível resolvê-lo directamente. No entanto, dado que os valores das correntes absorvidas pelos nós não são conhecidos, os únicos de que dispomos são os valores das potências consumidas. Como a potência relaciona a tensão e a corrente, só é possível obter o valor da corrente se se conhecer o valor da tensão, que é a incógnita do problema. Daí o aparecimento das não linearidades do sistema.

Vamos então analisar os dados para os diferentes tipos de nós:

-barramento PQ

$$E_i I_i^* = P_i^{SP} + jQ_i^{SP} = P_{pi}^{SP} - P_{ci}^{SP} + j(Q_{pi}^{SP} - Q_{ci}^{SP}) \quad (2.17)$$

representando os índices pi e ci, respectivamente, potência produzida e consumida, e o índice i, potência injectada.

-barramento PV

$$|E_i| = V_i^{SP} \quad (2.18)$$

$$\text{Real} \{ E_i I_i^* \} = P_i^{SP} = P_{pi}^{SP} - P_{ci}^{SP} \quad (2.19)$$

-barramento de referência

$$|E_i| = E_i = V_i^{SP} \quad (2.20)$$

$$\angle E_i = 0$$

Para a resolução do problema de cálculo de trânsitos de potência existem vários métodos, sendo no entanto o método de Newton-Raphson e o de desacoplamento os mais vulgarmente utilizados.

Outros métodos existem, entre os quais se cita o Gauss-Seidel e o de Impedâncias Nodais, os quais estão sumariamente referidos no Anexo 3.

Antes da descrição dos passos mais importantes do método de Newton-Raphson, vamos fazer uma breve referência a outros métodos, sendo de realçar que todos eles se baseiam na 1ª lei de Kirchhoff (lei dos nós).

Método de Newton-Raphson [7,8,9,10]

Este método baseia-se no método de Newton-Raphson para a resolução de um sistema de equações da forma: $F(X) = 0$. Como o método só é aplicado a sistemas de funções reais de variáveis reais, será necessário transformar as equações do sistema eléctrico em equações reais, desdobrando-as nas correspondentes parte real e imaginária.

Formulando para desvios de potência teremos:

$$\Delta S_i = S_i^{SP} - S_i^{CAL} = 0 \quad (3.21)$$

onde

S é a potência - $S = P + jQ$

De acordo com o modo como se representa a tensão, assim, a formulação do método de Newton-Raphson se diz ou em coordenadas polares ou rectangulares. No caso presente optou-se por desenvolver as equações na forma rectangular, atendendo ao facto que na forma polar surgem funções trigonométricas, tais como senos e cosenos, que introduzem mais ou menos erros, consoante a precisão da máquina em que se trabalha.

Assim

$$S_i^{CAL} = P_i + jQ_i = U_i I_i^* \quad (3.22)$$

onde

U_i é a tensão no barramento i

I_i é a corrente injectada no barramento i

$$I_i = \sum_{k=1}^n Y_{ik} U_k \quad (3.23)$$

onde

Y_{ik} é o elemento ik da matriz das admitâncias nodais, referida nos métodos anteriores.

Substituindo em 3.22 obtém-se

$$S_i^{CAL} = U_i \left[\sum_{k=1}^n Y_{ik} U_k \right] \quad (3.24)$$

Escrevendo a tensão e a impedância em coordenadas rectangulares teremos então:

$$U_k = e_k + jf_k \quad (3.25)$$

$$Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik} \quad (3.26)$$

Desenvolvendo 3.24, teremos

$$S_i^{CAL} = \sum_{k=1}^n [(e_i + jf_i) (G_{ik}e_k - jG_{ik}f_k - jB_{ik}e_k - B_{ik}f_k)] \quad (3.27)$$

Desdobrando 3.27 em parte real e parte imaginária, obtém-se

$$P_i^{CAL} = \sum_{k=1}^n [e_i (G_{ik}e_k - B_{ik}f_k) + f_i (G_{ik}f_k + B_{ik}e_k)] \quad (3.28)$$

e

$$Q_i^{CAL} = \sum_{k=1}^n [f_i (G_{ik}e_k - B_{ik}f_k) - e_i (G_{ik}f_k + B_{ik}e_k)] \quad (3.29)$$

Pode ainda escrever-se

$$(U_i^{CAL})^2 = e_i^2 + f_i^2 \quad (3.30)$$

Assim, as equações resultantes para os desvios de potência para o barramento i são as seguintes:

- barramento PQ

$$\Delta P_i = P_i^{SP} - P_i^{CAL} \quad (3.31)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{SP} - Q_i^{CAL} \quad (3.32)$$

- barramentos PV

$$\Delta P_i = P_i^{SP} - P_i^{CAL} \quad (3.33)$$

$$(\Delta U)^2 = (U_i^{SP})^2 - (U_i^{CAL})^2 \quad (3.34)$$

- barramento de referência

não é necessária qualquer equação.

Pelo método de Newton-Raphson teremos então

$$F(X^{(0)}) + J^{(0)} \Delta X^{(0)} = 0 \quad (3.35)$$

expressão que é equivalente a

$$F(X^{(0)}) = -J^{(0)} \Delta X^{(0)} \quad (3.36)$$

onde

J representa o jacobiano da função F(X) calculado no ponto $X^{(0)}$.

Escrevendo a equação 3.36 para o sistema eléctrico, teremos o seguinte sistema:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ (\Delta U)^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S & T \\ U & W \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Se existirem N nós, Z forem do tipo PQ, T do tipo PV e um de referência dos argumentos, a matriz do jacobiano terá dimensão $2*(Z+T)$, tendo as submatrizes as seguintes dimensões

S: $(Z+T)*(Z+T)$
 T: $(Z+T)*(Z+T)$
 U: $(Z+T)$
 W: $(Z+T)$
 C: $(Z+T)$
 D: $(Z+T)$

Sendo os valores dos elementos dados por:

$$S_{ik} = e_i G_{ik} + f_i B_{ik} \quad (3.38)$$

$$T_{ik} = -e_i B_{ik} + f_i G_{ik} \quad (3.39)$$

$$U_{ik} = f_i G_{ik} - e_i B_{ik} \quad (3.40)$$

$$W_{ik} = -f_i B_{ik} - e_i G_{ik} \quad (3.41)$$

$$C_{ik} = 0 \quad (3.42)$$

$$D_{ik} = 0 \quad (3.43)$$

e

$$S_{ii} = a_i + e_i G_{ii} + f_i B_{ii} \quad (3.44)$$

$$T_{ii} = b_i - e_i B_{ii} + f_i G_{ii} \quad (3.45)$$

$$U_{ii} = -b_i + f_i G_{ii} - e_i B_{ii} \quad (3.46)$$

$$W_{ii} = a_i - f_i B_{ii} - e_i G_{ii} \quad (3.47)$$

$$C_{ii} = 2e_i \quad (3.48)$$

$$D_{ii} = 2f_i \quad (3.49)$$

em que

$$a_i = G_{ii}e_i - B_{ii}f_i + \sum_{k=1 \neq i}^n (G_{ik}e_k - B_{ik}f_k) \quad (3.50)$$

$$b_i = G_{ii}f_i + B_{ii}e_i + \sum_{k=1 \neq i}^n (G_{ik}f_k + B_{ik}e_k) \quad (3.51)$$

Resolvendo 3.37 obtém-se os valores das tensões nos nós com os quais se pode calcular novamente os valores das potências. Este processo é repetido até ser satisfeita a condição de erro.

Normalmente, nos sistemas eléctricos utiliza-se como condições de paragem do processo iterativo as seguintes:

$$|\Delta P_i| < C_1 \text{ para todos os barramentos PQ e PV}$$

$$|\Delta Q_i| < C_2 \text{ para todos os barramentos PQ}$$

sendo os valores de C_1 e C_2 iguais a, aproximadamente, 1MW/MVAr.

Notar ainda que nas redes de distribuição, normalmente só existe um nó fonte, correspondente à subestação alimentadora, e que é considerado como nó de referência dos argumentos, sendo todos os outros do tipo PQ. Como tal o sistema terá a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S & T \\ U & W \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix}$$

em que as matrizes S , T , U e W são quadradas de dimensão $Z \times Z$, e em que Z é o número de barramentos PQ e igual a

$Z = \text{número total de barramentos} - 1$.

2.3. Aspectos comuns e distintos

2.3.1. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA COMO PROBLEMAS DE OPTIMIZAÇÃO [13]

Após terem sido descritos os modelos matemáticos para as redes de gás e redes eléctricas, neste capítulo vai-se apresentar uma abordagem comparativa de ambos.

O problema de cálculo de fluxos nos ramos e pressões/tensões nos nós, para as redes eléctricas em corrente contínua ou corrente alternada usando o modelo DC e de gás pode ser visto como um problema de optimização, no qual o objectivo é minimizar as perdas na rede. Assim

$$\min \sum_i \frac{K_i}{\gamma+1} q_i^{\gamma+1} \tag{3.68}$$

suj:

$$A q = L$$

em que

	<u>Eléctrica</u> (corrente contínua)	<u>Gás</u>
K_i constante do ramo i	Resistência (Ω)	K
q_i fluxo no ramo i	Intensidade (A)	q ($m^3 s^{-1}$)
γ expoente	1	>1

A matriz de incidências nodais, rectangular com o número de linhas igual ao número de nós e o número de colunas igual ao número de ramos. O elemento a_{ij} da linha i coluna j da matriz A corresponde ao nó i ramo j e é definido como:

$$a_{ij} = \begin{cases} +1 & \text{ramo } j \text{ entra no nó } i \\ -1 & \text{ramo } j \text{ sai do nó } i \\ 0 & \text{ramo } j \text{ não ligado ao nó } i \end{cases}$$

L vector das cargas

q vector dos fluxos nos ramos

Escrevendo o Lagrangiano obtém-se

$$L(q, \lambda) = \frac{K}{\gamma+1} q^{\gamma+1} + \lambda^t (L - Aq) \quad (3.69)$$

A condição de ponto estacionário é dada por

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial q} = K q^\gamma - A^t \lambda = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = L - Aq = 0 \end{cases} \quad (3.70)$$

Nas redes eléctricas $\gamma=1$

$$\begin{cases} Kq - A^t \lambda = 0 \\ L - Aq = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} Kq = A^t \lambda \\ \dots \end{cases} \quad (3.71)$$

$$\begin{cases} I = K^{-1} A^t V \\ Aq = L \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \dots \\ A K^{-1} A^t \lambda = L \end{cases} \quad (3.72)$$

sendo $AK^{-1}A^t$ a matriz das admitâncias Y podemos interpretar λ como sendo as tensões nodais, obtendo-se para a corrente contínua $YV = L$.

Para o gás $\gamma=1.848$ v $\gamma=1.854$ donde

$$\begin{cases} Kq^\gamma - A^t \lambda = 0 \\ L - Aq = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} q^\gamma = K^{-1} A^t \lambda \\ \dots \end{cases} \quad (3.73)$$

$$\begin{cases} q^\gamma = K^{-1} A^t \lambda \\ A q = L \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \text{---} \\ A \left(K^{-1} A^t \lambda \right)^{\frac{1}{\gamma}} = L \end{cases} \quad (3.74)$$

O que permite interpretar λ como sendo o quadrado das pressões nodais (nas redes de média ou alta pressão).

Como $A^t P = \Delta P$, em que P é o quadrado das pressões, então

$$\begin{cases} \text{---} \\ A \left(K^{-1} \Delta P \right)^{\frac{1}{\gamma}} = L \end{cases} \quad (3.75)$$

que é a equação matricial para as redes de gás.

Como se constata, chegámos às equações matriciais que definem uma rede eléctrica e uma rede de gás. O cálculo de fluxos não é mais que um problema em que o objectivo é minimizar as perdas Joule no caso das redes eléctricas e as perdas por atrito transformadas em calor nas redes de gás, ou seja, chegar a um ponto de energia mínima dissipada no sistema.

2.3.2. TOPOLOGIA

Tanto as redes de gás como as eléctricas são redes normalmente malhadas, sendo, no entanto, as redes eléctricas de distribuição exploradas habitualmente de forma radial. Todavia, será necessário atender ao facto que se poderá pretender estudar casos de fecho de anéis, pelo que o modelo matemático foi desenvolvido neste sentido. Assim, podemos dizer que em ambos os casos tratámos de redes malhadas.

A descrição dos elementos constituintes da rede é, basicamente, a mesma, mas, como é evidente, os dados para as redes de gás e para as eléctricas são diferentes. Queremos, com isto, dizer que existe uma correspondência directa entre os valores que se introduzem quer para uma quer para a outra.

Ramos	
Gás	Electricidade
Comprimento Diâmetro Rugosidade	Comprimento Secção Impedância { Resistência Indutância Capacidade

Nós carga	
Gás	Electricidade
q - Caudal absorvido	$\left\{ \begin{array}{l} S_p - \text{Potência produzida} \\ S_c - \text{Potência consumida} \\ S_c - S_p = \text{Potência absorvida} \end{array} \right.$

Nós Fonte	
Gás	Electricidade
p - Pressão	E - Tensão

Como se referiu a topologia das redes é semelhante. As redes são passíveis de serem representadas por grafos, que permitem uma representação da estrutura da rede bastante explícita. Se nos abstrairmos das diferenças de dados entre as redes de gás e electricidade, vistas atrás, e pensarmos apenas na rede em si, como uma estrutura, verificámos que a representação é totalmente idêntica.

Assim, o grafo representativo da rede pode ser representado por uma matriz, que é a forma mais simples e usual de o representar. Quer no gás quer na electricidade as matrizes associadas aos grafos são idênticas e representam a topologia da rede.

Para a sua representação será necessário definir um nó referência, em que a variável de estado (pressão/tensão) é conhecida. Após definido o nó referência definem-se os outros como nós carga em que é conhecido o valor da carga (caudal/potência), e em que pode ser positivo, negativo ou nulo. A representação de nós em que o valor da carga é nulo, é usada para representar qualquer mudança topológica da rede.

Para definir completamente a topologia de uma rede é necessário, ainda, atribuir uma direcção a cada ramo, que normalmente se associa ao modo como é definido o ramo, positiva na direcção de definição do ramo.

A conexão de uma rede pode ser, então, descrita pela matriz de incidências nodais $A = [a_{ij}]_{n \times m}$. A matriz é rectangular com o número de linhas igual ao número de nós e o número de colunas igual ao número de ramos. O elemento t_{ij} da linha i coluna j da matriz A corresponde ao nó i ramo j e é definido como:

$$a_{ij} = \begin{cases} +1 & \text{ramo } j \text{ entra no nó } i \\ -1 & \text{ramo } j \text{ sai do nó } i \\ 0 & \text{ramo } j \text{ não ligado ao nó } i \end{cases}$$

Como a topologia das redes para o gás e a electricidade é semelhante, então, podemos definir as correspondentes matrizes de incidências da mesma forma.

É necessário, no entanto, que na construção da matriz de incidências se considere a topologia da rede dividindo a matriz em duas submatrizes, uma correspondente aos ramos pertencentes à árvore e outra à co-árvore. Como se viu, os resultados que se pretende obter num estudo de uma rede de gás são as pressões em todos os nós e os caudais (fluxos) em todos os ramos, o mesmo se passando para as redes eléctricas em que se pretende chegar a tensões em todos os nós, e correntes (fluxos) em todos os ramos. Nos dois casos, a forma das equações é semelhante, sendo os sistemas a resolver em tudo parecidos. Para as redes de gás temos:

$$\Delta P = K Q^\gamma \quad (3.76)$$

onde

ΔP é a diferença dos quadrados das pressões

K é a constante da conduta

Q é o caudal na conduta (fluxo)

γ é o expoente do caudal que é variável consoante se trata de alta, média ou baixa pressão

e para as redes eléctricas

$$\Delta E = Z I \quad (3.77)$$

onde

ΔE é a queda de tensão, diferença das tensões

Z é a constante da linha (impedância)

I é a corrente na linha (fluxo)

De notar que a diferença principal entre os dois casos reside no expoente do fluxo e na queda de pressão/tensão a qual nas redes de gás é definida como sendo uma diferença de quadrados e nas redes eléctricas apenas como diferença.

Analisando as duas equações, verifica-se de imediato que a primeira é não linear para $\gamma \neq 1$, enquanto a segunda é sempre linear. No entanto, como foi explicado no ponto 2.2 a equação 3.77 torna-se não linear devido ao facto de se definir as cargas pela sua potência que é função da tensão e da corrente. Ficam então ambas as equações não lineares embora por motivos diferentes.

Devido à não linearidade, foi necessário desenvolver um método iterativo para a resolução tanto do problema do gás como do eléctrico. Das duas possibilidades de cálculo baseadas nas duas leis de Kirchhoff, ambos os métodos escolheram basear-se na 1ª lei de Kirchhoff (lei dos nós). A grande vantagem é que ambos os sistemas produzem matrizes muito esparsas (devido às poucas ligações que existem em cada nó), pelo que é possível usar rotinas específicas de tratamento de esparsidade e de factorização de matrizes.

Nos dois métodos utilizados, para a resolução do sistema faz-se uso de equações do método de Newton, calculando-se em ambos o jacobiano que tem estrutura semelhante. Tanto para as redes eléctricas em corrente alternada usando equações em coordenadas polares como para as de gás o jacobiano é definido por:

$$J = A_1 D A_1^t \quad (3.78)$$

em que

D é uma matriz diagonal.

Na construção do jacobiano só a matriz D é alterada na passagem de uma rede de gás para uma rede eléctrica devido à diferença de equações. É oportuno referir que o modelo matemático apresentado anteriormente para a electricidade, desenvolvido em coordenadas rectangulares, o jacobiano não tem rigorosamente a forma da equação 3.78,. No entanto, é possível, manipulando as equações chegar a uma expressão daquele tipo, o que todavia não é necessário na prática.

É necessário referir ainda que no caso das redes eléctricas o jacobiano tem uma dimensão dupla, em virtude das equações serem complexas e como tal terem que ser desdobradas na sua parte real e imaginária, pelo que J representa uma das submatrizes, sendo unicamente alterado o valor de D entre as quatro submatrizes.

Apesar de se ter obtido uma formulação matemática para as redes eléctricas e de gás baseada na matriz de incidências nodais, computacionalmente não é eficaz o uso directo desta matriz. Como se pode verificar de 3.78 para calcular o jacobiano seria necessário efectuar o produto de três matrizes, sendo uma delas, por sua vez, resultante da transposição de outra. Esta multiplicação computacionalmente consome bastante tempo, pelo que foram desenvolvidas outras técnicas que permitem, baseando-se em sistemas de apontadores, efectuar a sua construção directa. As técnicas de inspecção e construção directa são muitíssimo mais eficientes e computacionalmente muito mais baratas.

Outro exemplo, de produto de matrizes que normalmente se utiliza e que pode ser substituído de modo fácil por algoritmos computacionalmente mais eficazes é

$$A_t^{-1} A_c \quad (3.79)$$

onde

A_t^{-1} é a inversa da submatriz de incidências nodais correspondente à árvore

A_c é a submatriz de incidências nodais correspondente à co-árvore

e que determina os anéis existentes num determinado grafo. Repare-se, então, que para o cálculo dos anéis é necessário inverter uma matriz e seguidamente efectuar o produto da matriz resultante por uma outra. Este processo é bastante pesado, sendo possível recorrendo a outros algoritmos, efectuar a inspecção directa dos anéis. Note-se que é possível construir A_t^{-1} directamente, visto ser a matriz dos passos, ou seja, indicar quais os ramos que se percorre a partir da referência até se chegar a determinado nó. Utilizando a construção directa de A_t^{-1} diminui-se o peso computacional mas não o suficiente para se usar 3.79 face aos algoritmos de construção directa.

Atendendo ao exposto, desenvolveu-se o algoritmo de construção directa do jacobiano e reduziu-se ao máximo a utilização de matrizes e operações entre elas. Com esta técnica diminui-se bastante o tempo de cálculo e a memória utilizada, permitindo-se ainda com a construção directa do jacobiano que este não obedecesse rigorosamente à estrutura da equação 3.78.

3. CONCEPÇÃO DE INTERFACE GRÁFICA POLIVALENTE

3.1. Introdução [12]

Um trabalho de software deverá apresentar uma interface o mais amigável possível, para evitar a rejeição por parte daqueles menos familiarizados com os meios informáticos.

Todos os programas interactivos requerem um período mais ou menos longo de treino para que possam ser utilizados com a devida eficiência. Muitos são de fácil aprendizagem, outros porém, obrigam a um estudo e a uma prática mais ao menos aprofundados que pode levar várias semanas, sendo por vezes necessário o recurso a sessões específicas de treino. Durante o período de aprendizagem os futuros utilizadores vão conhecer os comandos e familiarizar-se com o seu uso, bem como com a saída de resultados.

A todos estes aspectos que relacionam um programa com o utilizador podemos chamar a *interface com o utilizador*.

pois, importante o modo como é desenhada visto que uma interface pobre, além de ser de difícil apreensão, é por vezes responsável por tornar os programas ineficientes e, diversas vezes, levar a que sejam rejeitados.

Neste trabalho, a interface com o utilizador teve papel importante, pois pretende-se vir a alterar o modo de desenho de esquemas de redes.

O objectivo é o de este produto passar a ser a ferramenta de trabalho dos desenhadores e pessoal ligado à exploração de redes.

Tendo em vista os objectivos, procurou-se desenvolver uma plataforma que, além de efectuar as operações normalmente realizadas pelos desenhadores, fornecesse ainda algumas vantagens adicionais.

Requisitos da interface com o utilizador

À construção de uma interface com o utilizador devem presidir os seguintes quatro pontos básicos:

-O primeiro ponto, e talvez o mais importante, é captar e transmitir ao programa a sequência de operações que são normalmente efectuadas para a realização do trabalho. Assim, o objectivo é simular, tanto quanto possível, o mundo real. A ordem das operações a efectuar deverá seguir de perto a realidade para que a resistência ao salto do modo tradicional para o uso do computador seja reduzida por parte dos utilizadores.

-Outro ponto a considerar no desenho da interface, e não menos importante, é a linguagem usada para a definição dos comandos. Esta deve-se aproximar da normalmente utilizada, ou seja, da linguagem natural. Os comandos deverão ser de fácil visualização e leitura. Se este ponto for satisfeito evita-se que os utilizadores recorram frequentemente a manuais de utilização para esclarecimento de dúvidas.

-O terceiro ponto a considerar é a forma como o programa indica ao utilizador que a tarefa foi ou não realizada. Assim serão de prever inúmeras mensagens que indiquem ao utilizador a forma como o programa está ou não a realizar determinada tarefa ou a sequência de tarefas. Será necessário também que toda a entrada de dados seja automaticamente visualizada pelo utilizador para que não subsistam dúvidas, como por exemplo, o caso do movimento do rato, que deve ser automaticamente acompanhado por um movimento visível no monitor.

-O último ponto prende-se com a forma como os vários objectos aparecem no ecrã. Estes devem-se identificar tanto quanto possível com a realidade, através de uma adequada representação simbólica.

Se no desenho de uma interface estes quatro pontos forem satisfeitos estaremos muito perto de um produto que, em princípio, será bem acolhido pelos futuros utilizadores.

3.2. Ferramentas de construção (ATEGA+MAKEFONT) [14]

Para o desenvolvimento da interface gráfica recorreu-se ao uso do sistema ATEGA [14], desenvolvido integralmente no INESC e que oferece um conjunto de rotinas gráficas destinadas ao modo gráfico de alta resolução do controlador EGA (Enhanced Graphic Adapter), que podem ser chamadas por programas escritos em C ou Pascal, sobre ambiente MS-DOS.

É possível também a utilização do mesmo sistema para desenvolvimento de programas em modo gráfico de mais alta resolução, como por exemplo, para o controlador VGA.

Com o software ATEGA permite-se uma abstração dos detalhes de programação do controlador, conseguindo-se um eficiente desenvolvimento de programas com um ambiente amigável de utilização gráfica interactiva.

Devido à programação directa em Assembly 8086, resulta uma excelente eficiência do conjunto de primitivas gráficas desenvolvidas, pelo que se tende cada vez mais para um alargamento das potencialidades do sistema.

Presentemente, encontra-se construído todo um pacote de funções completamente testado por vários trabalhos realizados, e no qual o presente também se insere.

As funções do ATEGA encontram-se agrupadas em vários módulos que podem ser usados independentemente, de acordo com certas regras de precedência hierárquica: a utilização de um certo módulo obriga ao uso de todos os outros hierarquicamente inferiores. Na versão utilizada os módulos existentes são os seguintes, por ordem crescente de nível hierárquico:

WIMEGA.OBJ - gestão de janelas.

TEXEGA.OBJ - funções para desenho de texto

CLIPEGA.OBJ - rotinas de "clipping"

ATEGA.OBJ - primitivas gráficas

O módulo ATEGA constitui o núcleo de primitivas gráficas de desenho, sobre as quais assenta o resto do sistema. Neste módulo estão incluídas rotinas para desenho de pontos, rectas, rectângulos e preenchimento de regiões. É o único módulo escrito em Assembly. A memória vídeo fora do écran é utilizada para implementar um sistema de gravação e recuperação de blocos de imagem, o que permite várias operações que resultam com grande eficiência.

Hierarquicamente acima situa-se o módulo CLIPEGA, composto por um conjunto de rotinas de desenho, operadas por funções de "clipping". Todas estas funções estão escritas em C e consideram uma região rectângular global para "clipping". Neste módulo estão incluídas mais funções para gravação/reprodução de blocos de imagem em memória do sistema com alocação dinâmica.

O módulo TEXEGA contém todas as funções destinadas ao desenho e controlo de texto. Os caracteres desenhados são obtidos de um ficheiro fonte. É possível carregar para memória e manter residentes até 4 ficheiros fonte, num total possível de 8 conjuntos diferentes de caracteres ASCII. O texto desenhado é controlado por atributos que podem ser modificados usando funções apropriadas: posição, dimensão, orientação, cor de texto e fundo, espaçamento de linhas e de caracteres, e outros. Estão ainda incluídas algumas funções destinadas à leitura de cadeia de caracteres pelo teclado, com facilidade de edição e validação automática de tipos: por exemplo, pode-se programar a aceitação apenas de dígitos, letras e outros.

Finalmente, o módulo WIMEGA permite ao programador criar um ambiente de utilização multijanela nas suas aplicações, oferecendo-lhe um conjunto de rotinas para gestão de várias janelas simultâneas, com refrescamento automático de imagem destruída pela sobreposição entre elas.

Referiu-se, na descrição sumária do módulo TEXEGA, que os caracteres a serem desenhados provinham de um ficheiro fonte, não se falando do modo como este ficheiro era obtido. Para o preenchimento do ficheiro fonte foi desenvolvido um programa (MAKEFONT) baseado no software ATEGA, que permite a construção dos caracteres e posterior colocação numa posição escolhida pelo utilizador (entre 32 e 286). No programa desenvolvido é dada ao utilizador a possibilidade de desenhar um qualquer carácter, tendo como auxiliar um dispositivo apontador (rato); as dimensões dos caracteres são escolhidas pelo utilizador até ao limite de 255x255 pixel. É possível desenhar além de caracteres de texto qualquer outro tipo de símbolo, sendo o seu tratamento idêntico ao do carácter.

Aquando do desenho de texto, será necessário o utilizador conhecer qual o código do carácter, se não tiver mantido a correspondência normalmente usada entre os códigos ASCII e os caracteres.

3.3. Coordenação base de dados gráfica / base de dados características

Para a realização de cálculos sobre redes, quer sejam redes de energia, gás ou outras, é necessário existirem dados relativos aos diversos componentes das mesmas. Neste sentido, foi necessário criar uma base de dados onde possa ser armazenada toda a informação sobre os elementos constituintes da rede. Como o trabalho desenvolvido integra a possibilidade de desenho de redes, além dos dados relativos a características de nós, ramos, aparelhagem e outros, foi necessário guardar os dados que possibilitam a construção gráfica do esquema da rede. Os dados gráficos terão necessariamente que estar relacionados com os dados dos componentes.

Neste subcapítulo iremos abordar a constituição da base de dados e o modo de relacionamento dessa informação.

No desenvolvimento das primitivas sobre as quais assenta o programa, foi tomado em atenção o facto de que se podia construir um sistema de redes individuais ou um sistema de redes globais. No caso individual, cada rede está representada numa e numa só carta, ao passo que no caso global pode estar em mais que uma carta, havendo neste segundo caso símbolos gráficos que indicam a passagem para outra carta. Assim, o sistema de base de dados terá forçosamente que ser diferente para os dois casos.

Se o sistema é desenvolvido para desenho, cálculo e arquivo de redes individuais, estamos perante uma base de dados local e individual. Esta será constituída por duas sub-bases, visto ser necessário dividir a informação relativa a dados gráficos daquela relativa a dados dos componentes, indispensável aos cálculos. Como em todas as bases de dados, existem chaves que permitem passar facilmente de uma sub-base a outra, relacionando a informação.

A sub-base correspondente à informação gráfica é constituída por três ficheiros: o de dados dos nós, o de dados das linhas e o de dados do texto. No primeiro é armazenada a informação relativa à posição e tipo do nó, o número chave do nó e os valores de coordenadas correspondentes à posição do texto inerente ao nó. No ficheiro de linhas é guardada a informação dos números chave dos dois nós (montante e jusante), as coordenadas do ponto inicial e final da linha e todas as coordenadas dos pontos de quebra da mesma. Neste ficheiro está ainda indicada a existência ou não de aparelhagem, em cada nó, e o seu tipo. Com os números chave é possível, recorrendo ao ficheiro de nós, saber o tipo e coordenadas dos mesmos, conhecendo-se automaticamente a posição da aparelhagem (conjugação da informação das coordenadas dos nós e dos extremos da linha).

O ficheiro de texto é totalmente independente, não havendo ligações com os outros ficheiros gráficos.

A correspondência entre os ficheiros gráficos e os de características é garantida pela existência do número chave. Os ficheiros de características, como o próprio nome diz, contêm a informação relativa aos dados dos componentes. Como facilmente se constata, para fazer a ligação aos ficheiros gráficos, é necessário estar também presente o número chave dos nós.

Finalmente, é necessário agrupar todos estes ficheiros e identificá-los com a rede que representam. Para isso criou-se um ficheiro mãe, que possui a identificação da rede e respectiva codificação dos ficheiros gráficos e de características.

Na figura 3.3.1 pode ver-se a representação esquemática das estruturas de informação representadas na Base de Dados.

Como se pode verificar, no caso de redes individuais a constituição e manipulação da base de dados é bastante simples.

No entanto, foram desenvolvidos simultaneamente outros procedimentos que também estão incluídos nas primitivas do sistema e que permitem criar e manipular uma base de dados mais complexa, como a desenvolvida para armazenamento de informação relativa a redes globais.

Como se disse atrás, uma rede global é aquela que não está representada numa única carta mas que se pode estender por duas, três ou mais cartas. Nestes casos, por vezes, é necessário usar a estratégia de repetir informação (partes de desenho) em mais que uma carta, para maior facilidade de interpretação das mesmas. A repetição é um meio de facilitar a identificação do troço de rede no terreno.

Esta possibilidade de duplicação de informação traz outros inconvenientes que se reflectem directamente na construção da base de dados, ou seja, a informação que é repetida em duas ou mais cartas terá que ser coerente. Qualquer alteração num ramo ou nó de uma carta, que também pertença a outra, terá que ser efectuada automaticamente nas duas, só assim é possível garantir a coerência da informação.

Tendo em linha de conta o atrás exposto, foi necessário desenvolver uma base de dados mais complexa. Optou-se por dividi-la em duas sub-bases: a sub-base global e a sub-base local.

A sub-base global compreende os ficheiros globais de características dos componentes e o ficheiro mãe, tal como é descrito no caso anterior.

A sub-base local é constituída por ficheiros de apontadores para a sub-base global e por ficheiros de dados gráficos e de texto de cada carta.

FICHEIRO MÃE

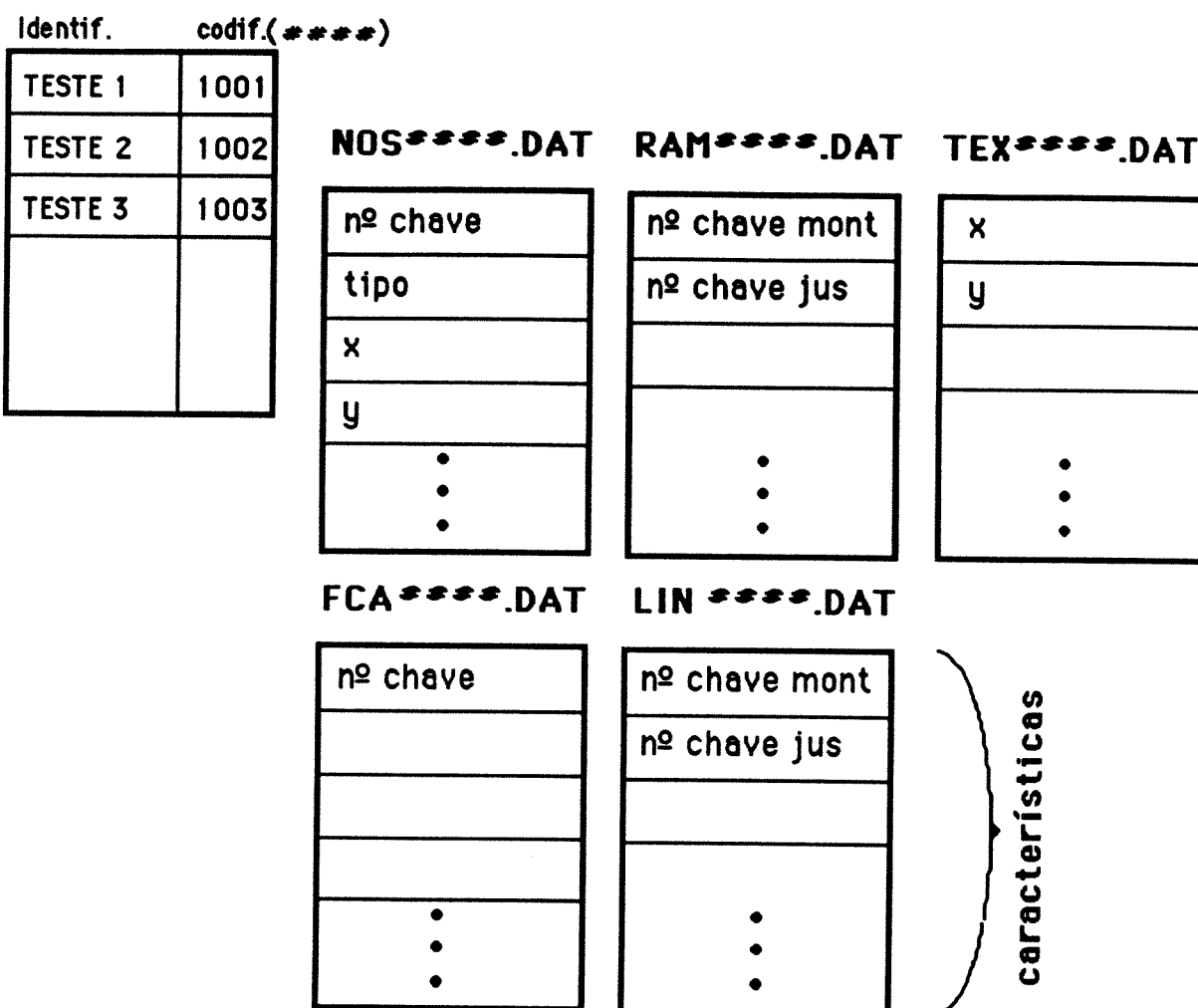


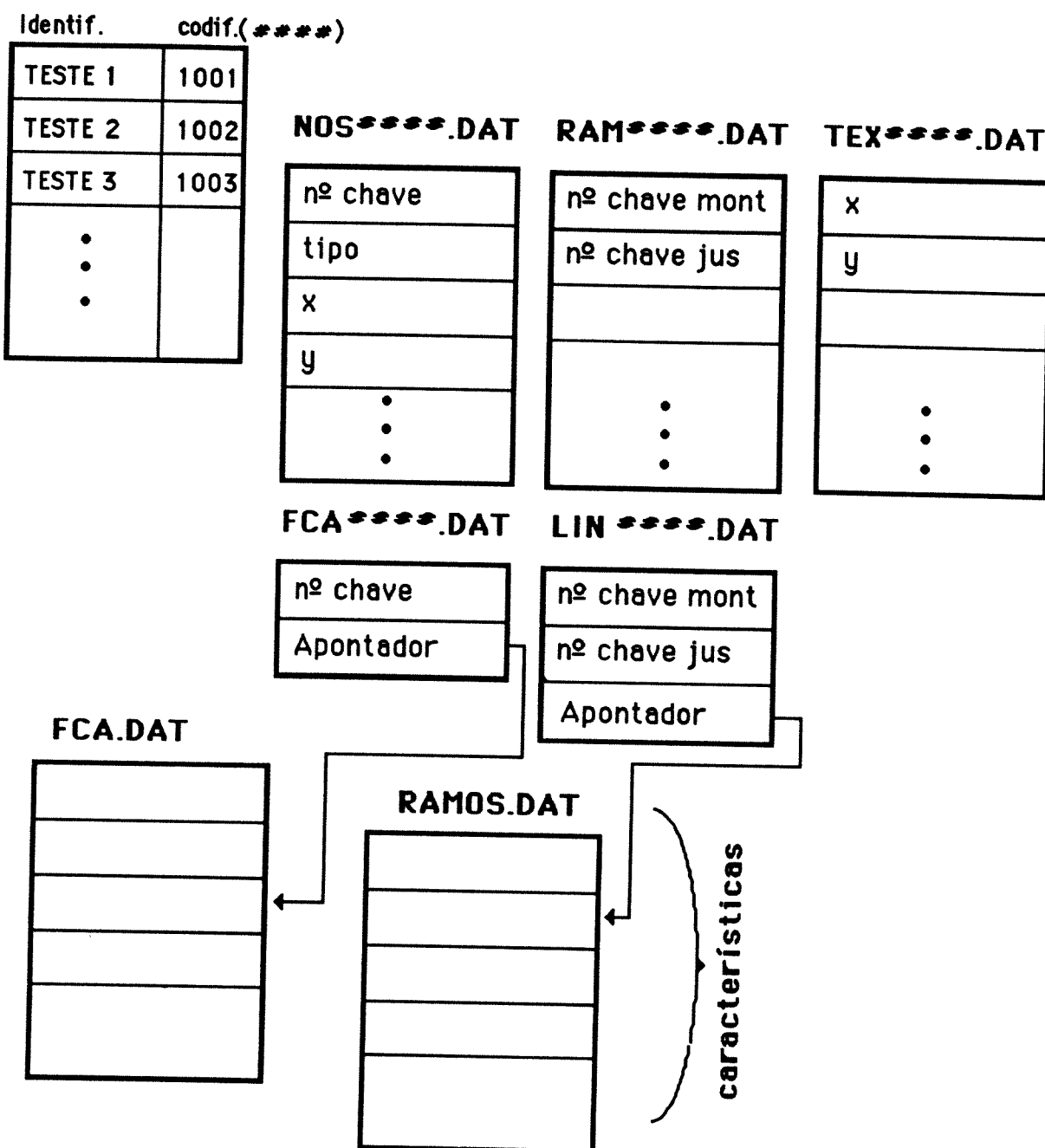
figura 3.3.1 - Representação esquemática das estruturas de informação representadas na Base de Dados

Os ficheiros gráficos são construídos da mesma forma que no primeiro caso (só base local), tendo portanto a mesma estrutura. Quanto ao ficheiro de texto fica inalterável relativamente ao primeiro caso. O mesmo não acontece com os ficheiros de características.

Agora não contém informação das características dos elementos da rede mas apenas são constituídos por apontadores para um ficheiro global (que se descreve mais adiante). Para mais fácil identificação e, portanto, para encurtar o tempo de acesso, além dos apontadores fazem também parte do ficheiro os números chave dos nós. A inclusão dos números chave nos ficheiros locais traz ainda outra vantagem que é a diminuição da

memória de massa, uma vez que sendo os números chave característicos de cada carta, seria necessário que o ficheiro global comportasse todos os possíveis números chave (tantos quantas as cartas em que o nó ou ramo existisse), o que, à partida, se desconhece.

FICHEIRO MÃE



Da sub-base global fazem parte os ficheiros globais de características que apenas contêm a informação necessária sobre os elementos das redes para se efectuar cálculos, e o ficheiro mãe que possui a identificação de cada rede e a respectiva codificação dos ficheiros gráficos e de apontadores.

Na figura 3.3.2 está representada a estruturação da informação quando há interdependência e sobreposição entre cartas adjacentes.

4. DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE GRÁFICA

4.1. ERG - Uma Proposta

Tendo como base o que foi exposto nos capítulos anteriores, desenvolveu-se um produto (denominado ERG - Estudos de Redes de Gás) capaz de permitir o desenho e cálculo de redes de gás. As especificações que presidiram à realização do trabalho foram:

Apresentação

Deverá ser possível desenhar redes que ocupem uma folha de tamanho A3, estando representado no ecran, em qualquer instante, metade da rede (folha de tamanho A4). A utilização de dois ecrans facilita a visualização da rede, uma vez que o desenho se torna menos denso.

O utilizador poderá fazer deslocar a carta no sentido ascendente ou descendente devendo ser criados dois botões para a realização de tal manobra. A posição da folha deverá ser assinalada por um rectângulo que se desloque numa barra vertical. A cada movimento da folha deverá corresponder uma deslocação do indicador de posição, no mesmo sentido.

Simbologia

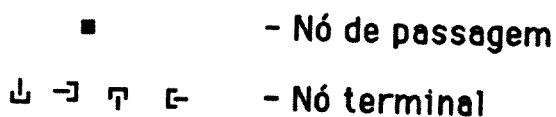
Os vários elementos foram divididos em diversas classes; assim temos:

- nós: como nós, foram definidos todos os elementos correspondentes a ligações de 2 ou mais condutas sem características, ou terminais de condutas.
- linhas: como linhas, foram definidos os troços que ligam um ou mais aparelhos e que podem ou não ter características. Foi ainda prevista a possibilidade de desenhar linhas que pretendam simular futuras ligações.
- fontes/cargas: neste grupo estarão as fontes, cargas, compressores e reguladores de pressão.
- aparelhagem: deste grupo farão parte os aparelhos de corte existentes nas condutas(válvulas).

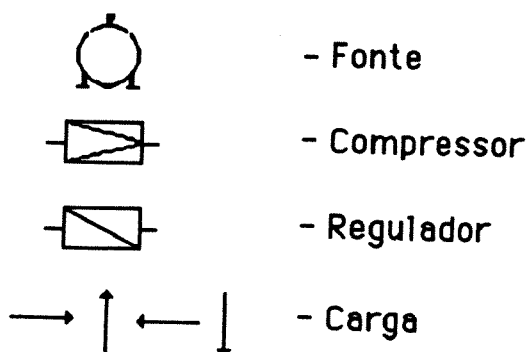
Descrevem-se a seguir os vários tipos de nós, linhas, aparelhagem e fontes/cargas.

nodos:

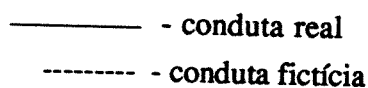
nós simples:



nós complexos:



linhas:



aparelhagem:



Todos estes símbolos quando agrupados de forma determinada possibilitam a realização dos esquemas de redes de gás. No ponto seguinte descreve-se as especificações de desenho.

Procedimentos de Desenho

Desenho de nós, fontes/cargas

Todos os elementos que constituem os grupos de nós e fontes/cargas poderão ser desenhados em qualquer ponto do esquema, desde que não sobreponham outros.

Desenho de condutas

As condutas serão sempre desenhadas entre dois nodos distintos (nodo - qualquer elemento pertencente ao grupo dos nós e fontes/cargas). Para iniciar o desenho de uma conduta deverá ser seleccionado em primeiro lugar um nodo, e para terminar a conduta será necessário seleccionar um outro nodo. Uma conduta nunca poderá ser desenhada se ter os seus pontos extremos coincidentes com dois nodos distintos. A conduta entre os seus extremos poderá comportar no máximo dez pontos de quebra e poderá ser desenhada em qualquer direcção.

Desenho de aparelhagem

A aparelhagem estará sempre desenhada nos extremos das condutas, podendo estas ser reais ou fictícias (simulação de ligação futura). Para o desenho da aparelhagem deverá ser sempre seleccionada em primeiro lugar a conduta onde se pretende incluir o aparelho e, seguidamente, o extremo da conduta desejado.

O desenho de um aparelho num dos extremos de uma conduta que já possua aparelho será feito do mesmo modo, sendo o aparelho anterior substituído pelo novo.

Desenho de texto

O programa deverá prever a escrita de texto nos esquemas. O texto deve poder ser desenhado em dois tamanhos diferentes, um tamanho pequeno e um normal.

O texto deverá poder ser escrito em quatro direcções diferentes (orientação: 12h, 1h30, 3h, 4h30).

Procedimentos de apagar

Apagar nodos

Deverá ser possível apagar todos os tipos de nodos, havendo no entanto que proteger o programa de forma a que um nodo só possa ser apagado quando não existirem linhas a ele ligadas.

Apagar condutas

Deverá ser criado um procedimento para apagar condutas, que permita seleccionar a conduta a apagar caso existam duas ou mais condutas em paralelo. Ao apagar a conduta deve ser também apagada toda a aparelhagem a ela associada.

Para se apagar uma conduta deverão ser seleccionadas previamente os dois nodos

extremos.

Apagar aparelhagem

Para apagar a aparelhagem existente numa conduta deverá ser seleccionada em primeiro lugar a conduta e seguidamente o nodo onde se encontra o aparelho a apagar. A conduta seleccionada deverá estar distinguida das demais.

Apagar texto

O texto deverá poder ser apagado qualquer que seja a orientação de escrita. Para se apagar o texto deverá aparecer no monitor, antes do início do texto, um pequeno símbolo que identifique o local onde o utilizador deverá carregar para o apagar.

Procedimentos de mover

Mover texto

O texto depois de escrito no esquema deverá poder ser deslocado para qualquer outro ponto. O texto deverá ser seleccionado da mesma forma que para apagar e, seguidamente, por arrasto do rato ser transportado para o local desejado.

Rodar texto

Como se disse atrás o texto deve poder ser escrito em quatro direcções diferentes, ou então ser escrito da forma habitual e depois ser rodado. Para o segundo caso, deverá ser criado um procedimento que permita que depois de seleccionado, o texto possa rodar.

Procedimentos de refrescar

Uma vez que ao apagar nodos, condutas ou texto poderão ficar outras partes do desenho afectadas, deverá ser criado um procedimento que permita redesenhar de novo todo o esquema, a partir dos dados já introduzidos.

Depois de efectuada esta operação a zona de desenho visível no ecran deverá ser a mesma de onde se partiu.

Visualização do esquema completo

Atendendo a que o esquema completo irá ocupar dois ecrans, deverá ser previsto um procedimento que permita em qualquer altura visualizar todo o esquema com redução de escala. Obviamente que a definição do desenho será de qualidade inferior.

Deslocamento do esquema

Dentro da janela de visualização do esquema completo da rede, deverá ser previsto um procedimento que permita o deslocamento do esquema, de forma a ser possível centrar o desenho no ecrã e no papel, aproveitar partes de um esquema para outro, etc..

Procedimento de impressão

Deverá ser possível fazer sair o esquema numa impressora.

Para a impressora, o esquema a sair deverá ser apenas o que se encontra no monitor.

Características do gás

Deverá ser possível definir as características do gás. Os valores a definir são:

Densidade do gás em relação ao ar (S)

Factor de compressibilidade (Z)

Temperatura ambiente (T_n) (Kelvin)

Pressão ambiente (P_n) (bar)

Viscosidade cinemática ($m^2 s^{-1}$)

Por defeito deverão aparecer os seguintes valores:

$$S = 0.589$$

$$Z = 1$$

$$T_n = 288$$

$$P_n = 1$$

$$V_{cin} = 0.00001350$$

Preferências

Grelha

Uma vez que o deslocamento contínuo do rato poderá provocar alguma dificuldade no desenho de condutas (horizontal e vertical), deverá ser criada uma grelha de modo a que o andamento do rato seja em saltos entre os nós da mesma. Para o tamanho da grelha deverão ser definidos três escalões diferentes. A grelha poderá estar visível, invisível, activa ou não activa.

Velocidade do rato

Deverá ser possível alterar a velocidade do rato, de modo a facilitar o seu manuseamento por pessoas menos familiarizadas com o sistema ou adaptá-lo à frequência do

processador usado..

Cálculos

Na realização de cálculos deverão existir mensagens que informem o utilizador quando aparecer qualquer problema relacionado com os dados dos componentes, como por exemplo, a não existência de dados relativos a um nó ou linha.

Depois de efectuados os cálculos deverá haver a possibilidade de o utilizador optar por visualizar os resultados directamente sobre o esquema ou por meio de uma tabela.

No esquema

Não deverão estar desenhados simultaneamente os resultados ligados aos nós e os resultados ligados às condutas, para facilitar a leitura e compreensão do esquema. O utilizador deverá poder escolher quais os resultados que pretende visualizar.

Mover resultados

Deverá ser criada uma opção que permita ao utilizador deslocar os resultados ligados a um determinado elemento para qualquer outro ponto do esquema.

Na tabela

Além de saírem no monitor as tabelas deverão poder ser impressas. Da mesma forma que no esquema, deverá existir uma tabela para os resultados nos nodos e outra para os resultados nas linhas.

Procedimentos de saída

Na saída do programa deverá ser possível ao utilizador gravar o esquema e respectivos dados ou, abandonar simplesmente, sendo neste caso perdida a informação. Será ainda de prever a possibilidade de alterar o nome do esquema, para possibilitar que para dois esquemas semelhantes não seja necessário o utilizador introduzir novamente todos os dados.

Características

Deverão ser introduzidas características para condutas, fontes, cargas, compressores e reguladores. A informação a guardar dependerá do tipo de elemento.

Estrutura de ficheiros

Ficheiro de esquemas

O nome pelo qual os esquemas são conhecidos poderá ter até 13 caracteres, e uma vez que para os ficheiros a gravar existe a limitação de 8 caracteres, deverá ser criado um ficheiro auxiliar que permita fazer a correspondência entre o nome do esquema e o nome do ficheiro. O ficheiro de esquemas deverá ter a seguinte estrutura:

nome	tipo	descrição
nome_esq	string(13)	nome pelo qual é conhecido o esquema
num_esq	inteiro	número que fará acesso ao ficheiro (1000 a 9999)
preferenc	char	indicará o modo como o utilizador abandonou o sistema, em termos de grelha (activa, não activa, ..)

O nome dos vários ficheiros relativos a um esquema serão compostos por "***num_esq", valendo os *** :

- nos - para o ficheiro de nós
- lin - para o ficheiro de linhas
- tex - para o ficheiro de texto.

Ficheiros Gráficos

Ficheiro de nós

No ficheiro de nós estará guardada a informação gráfica relativa às opções nós e fontes\cargas..

A estrutura do ficheiro é a seguinte:

nome	tipo	designação
xglobal	inteiro	coordenadas x do nodo;
yglobal	inteiro	coordenadas y do nodo;
num_no	inteiro	número que identifica o nodo e servirá de chave para o ficheiro de características;
y	inteiro	coordenadas onde começa a legenda do nodo.
x1, y1	inteiro	coordenadas que definem outro tipo de legenda;
tipo_no	inteiro	codificação do tipo do nodo, 1-30 -nó; 31-60 -fonte/carga;

Ficheiro de ramos

Neste ficheiro ficará armazenada a informação gráfica relativa às condutas. A estrutura do ficheiro será a seguinte:

nome	tipo	designação
nomon nojus	inteiro	número do nó montante e número do nó jusante. Estes números serão as chaves para o ficheiro de nós.
xm ym xj yj	inteiro	coordenadas dos extremos da conduita: nó montante e nó jusante.
po_que	[10,2] inteiros	coordenadas dos pontos de quebra da linha.
re_fic	char	carácter que indicará se a conduita é real ou fictícia (em termos gráficos se será continua ou tracejada).
apmon apjus	char	carácter que indicará se existe aparelho de corte, qual, e a sua posição nos extremos da conduita.

Ficheiro de texto

Neste ficheiro estará guardada a informação relativa ao texto. O texto será constituído por frases com um máximo de 25 caracteres. O ficheiro terá a seguinte estrutura:

nome	tipo	designação
x y	inteiro	coordenadas do ponto de início do texto
pos	inteiro	orientação do texto;
tam	inteiro	comprimento da frase
frase	string(25)	frase de texto.

Ficheiro de Características**Ficheiro de nodos**

No ficheiro de nodos deverá ficar guardada a informação relativa a características de nós e fonte/carga. Visto que para um nó fonte será necessário guardar a pressão e para o nó carga o caudal, deverá optar-se por guardar a informação num mesmo campo, para ganho de memória.

A estrutura do ficheiro deverá ser a seguinte:

nome	tipo	designação
no	string(10)	código do nó
auxno	char	carácter auxiliar
tipo	char	tipo do nó
ngrafno	inteiro	chave para o ficheiro gráfico
cota	real	cota a que se encontra o nó
caudal_pressao	real	valor da pressão para os nós fonte e compressores ou valor do caudal para os nós carga
nome	string(10)	nome do nó.
provisorio	char	

Ficheiro de ramos

Neste ficheiro deverá ficar armazenada a informação sobre as características das condutas.

A estrutura deverá ser a seguinte:

nome	tipo	designação
nomon	string(10)	código do nó montante
auxmon	char	carácter auxiliar
ap_cort_mon	char	indicação da posição do aparelho de corte
nografmon	inteiro	chave de acesso ao ficheiro de nós gráfico
nojus	string(10)	código do nó jusante
auxjus	char	carácter auxiliar,
ap_cort_jus	char	indicação da posição do aparelho de corte
nografjus	inteiro	chave de acesso ao ficheiro de nós gráfico
comprimento	real	comprimento da conduta em metros
diametro	real	diâmetro da conduta em milímetros
eficiência	real	eficiência da conduta
ordem	char	indica a qual das linhas pertencem as características
provisorio	char	indica se os dados têm ou não carácter provisório

Interface

Considerando as especificações e a finalidade do trabalho, procurou-se desenvolver uma interface que permita que o programa seja utilizado por qualquer pessoa sem ser necessária qualquer especialização ou familiaridade com os meios informáticos.

Podemos dividir o programa em três partes. A primeira corresponde à fase da selecção da rede a construir, visualizar ou estudar. Quando o utilizador arranca o sistema, surge a seguinte janela (figura 3.4.1).

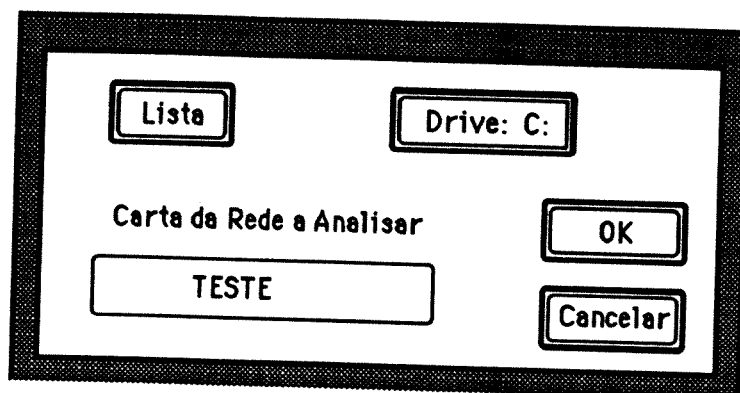


figura 3.4.1 - Janela de entrada do ERG

Selecctionando o botão *lista* é-lhe mostrada a lista de redes em memória, e o utilizador poderá seleccionar, apagar ou efectuar cópias de segurança (figura 3.4.2).

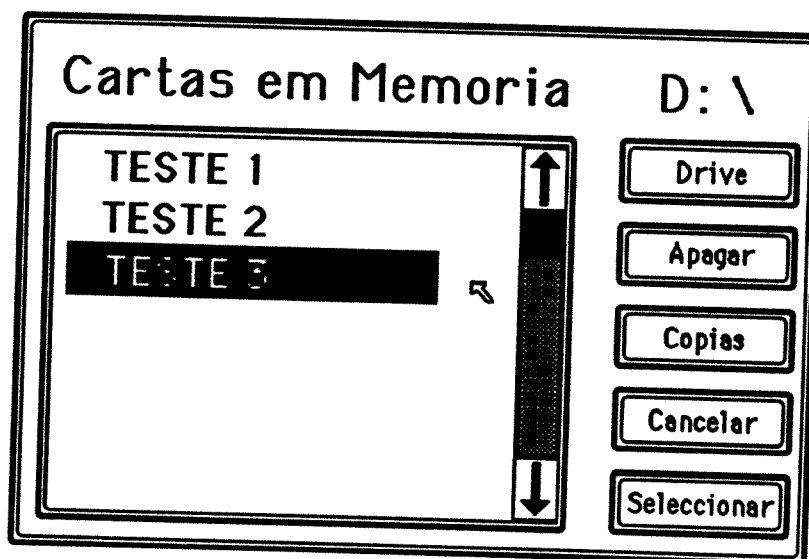


figura 3.4.2 - Janela de selecção de redes em memória

Seleccionando uma determinada rede passará à fase seguinte que constitui a parte essencial do sistema. Aparecerá então a janela que permite ao utilizador efectuar todas as operações sobre a rede (figura 3.4.3).

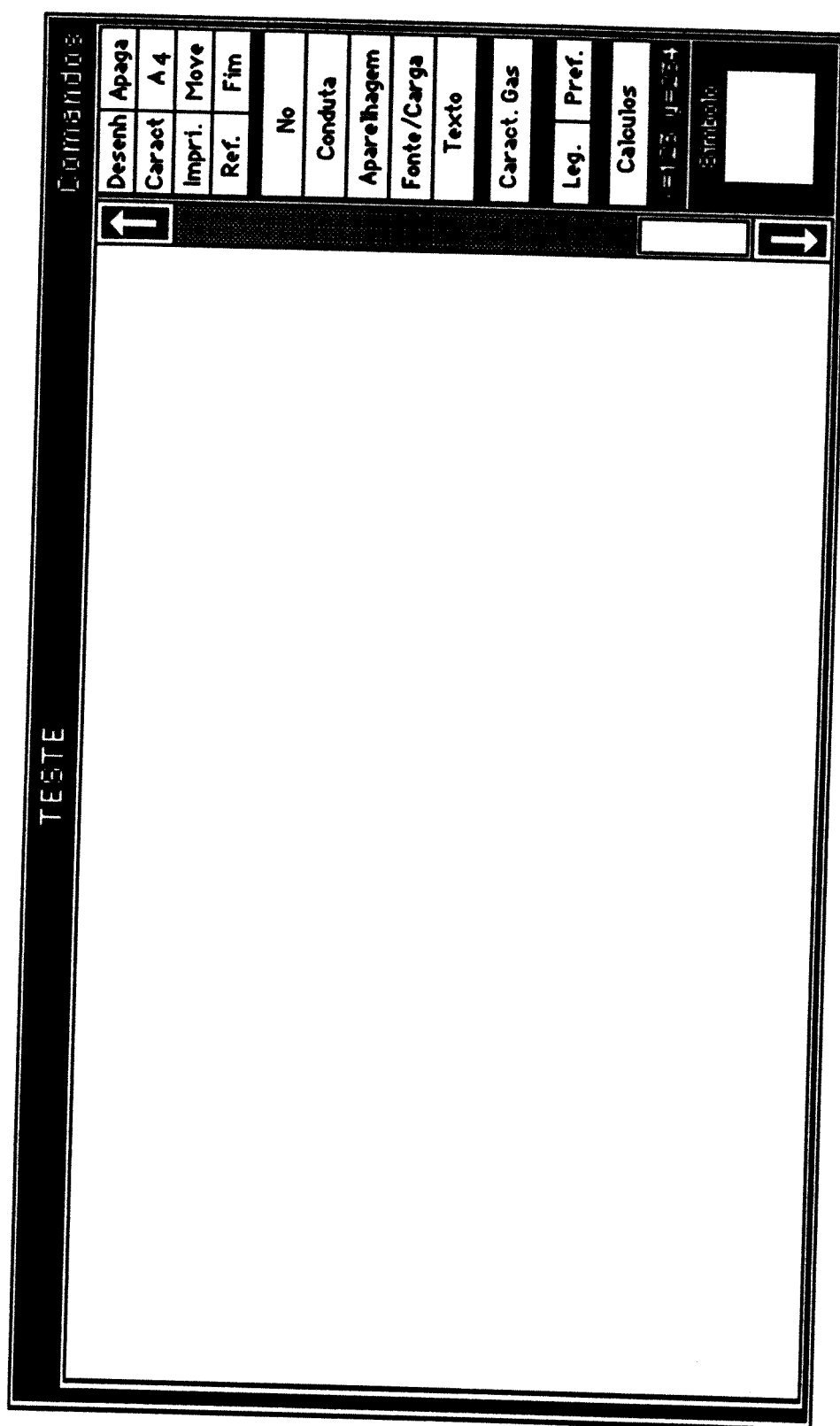


figura 3.4.3 - Janela de desenho

A selecção de qualquer operação é realizada por simples pressão do botão do rato quando este se encontra sobre o comando pretendido na janela de comandos (figura 3.4.4).

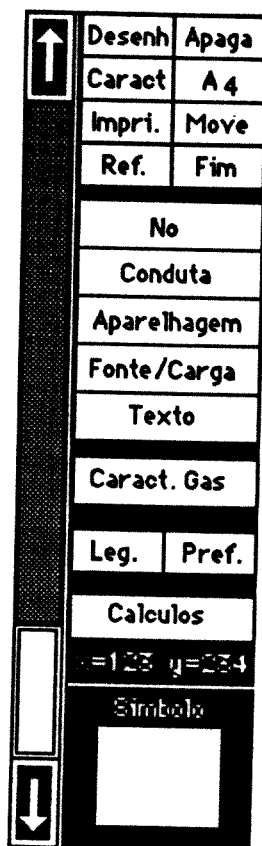


figura 3.4.4 - Menu principal

A única selecção que não é directa pelo que convem ser aqui referida, é a escolha de um nó, fonte/carga, linha ou aparelhagem, que é feita a partir de um sub-menu desdobrado do menu anterior (figura 3.4.5).

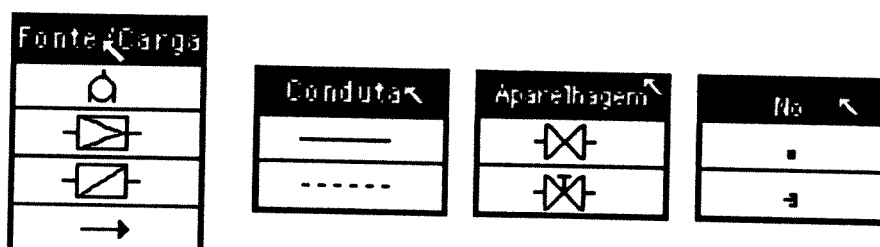


figura 3.4.5 - Desdobramentos do menu principal

Para caracterizar os componentes da rede basta o utilizador seleccionar o botão **características** e o botão do tipo de componente (**nó**, **fonte/carga ou linha**) e seguidamente seleccionar no esquema o elemento pretendido. Aparecerá, então, uma das seguintes janelas, consoante o elemento escolhido (figura 3.4.6, 3.4.7, 3.4.8)

FONTE /COMPRESSOR

A small dialog box with a title bar containing a cross icon. It has two buttons at the top: 'OK' and 'CANCELAR'. Below them is a label 'N. do nó' followed by a text input field with a dashed line. At the bottom are two buttons: 'Imprime' and 'Mais Dados'.

A larger dialog box with a title bar containing a cross icon. It has two buttons at the top: 'Imprime' and 'REGRESSAR'. Below them are three input fields labeled 'Cota', 'Pressao (bar)', and 'Nome'. At the bottom left is the label 'Provisorio' and at the bottom right is a checkbox with an 'X' inside.

figura 3.4.6 - Janelas de características das fonte/compressores

CARGA

A small dialog box with a title bar containing a cross icon. It has two buttons at the top: 'OK' and 'CANCELAR'. Below them is a label 'N. do nó' followed by a text input field with a dashed line. At the bottom are two buttons: 'Imprime' and 'Mais Dados'.

A larger dialog box with a title bar containing a cross icon. It has two buttons at the top: 'Imprime' and 'REGRESSAR'. Below them are three input fields labeled 'Cota', 'Caudal (m³/h)', and 'Nome'. At the bottom left is the label 'Provisorio' and at the bottom right is a checkbox with an 'X' inside.

figura 3.4.7 - Janelas de características das cargas

CONDUTA

✚

numero no ☒
 numero no ☐

✚

Comprimento (m)
 Diametro (mm)
 Eficiencia
 Ap. Corte No ☒
 Ap. Corte No ☐

Provisorio
 ☒

figura 3.4.8 - Janelas de características das condutas

Cálculos

Seleccionando o botão cálculos serão efectuados os cálculos sobre a rede descrita no esquema. Caso surjam problemas com as características, (por exemplo, existirem nodos ou linhas sem dados), então o cálculo é automaticamente interrompido e é afixada uma mensagem informando o utilizador qual o motivo da interrupção.

Para o cálculo da pressão nos diferentes nodos e fluxos nas condutas foi utilizado o método malha-nó, que provou ser o mais eficiente, como se pode constatar na descrição efectuada no anexo 2 deste trabalho.

No referido anexo, salienta-se que o método usado mantém as características de esparsidade do sistema, pelo que se desenvolveram rotinas que fazendo uso desta característica permitem melhorar substancialmente os tempos de cálculo. À medida que os sistemas crescem mais eficiente se torna o método e mais notórias são as diferenças em termos de tempo e memória necessária. O processo utilizado passa pelo uso de listas ligadas para o armazenamento das matrizes depois de efectuada a sua compactação, e em vez de se inverter o jacobiano optou-se por efectuar a sua factorização com ordenação dinâmica [18].

Com uso das técnicas acima referidas podemos dizer que os tempos de cálculo são de muito boa qualidade. Como exemplo, para uma rede de 22 nós e 36 condutas, o processo convergiu em 9 iterações, num tempo de aproximadamente 4 segundos com um erro de $3.921377E-05$ e para uma rede de 4 nós e 5 condutas o processo convergiu em 7

iterações, com um erro de 5.763975E-07 num tempo que não atingiu 1 segundo. Este tempo é o tempo de cálculo efectivo, sendo o tempo para o utilizador cerca de 1 segundo superior, atendendo a que é necessário o desenho das tabelas ou a afixação dos resultados no esquema.

Finalmente, será de salientar que a interface foi desenvolvida de forma generalizada, sendo possível a sua utilização para qualquer outro tipo de esquemas, bastando para tal redefinir o conjunto de caracteres que formam a simbologia usada, as janelas de características e o algoritmo de cálculo. Como o conjunto de caracteres é definido e desenhado externamente ao sistema (programa MAKEFONT), e as características e o algoritmo de cálculo fazem parte de módulos independentes, que terão que ser desenvolvidos de novo.

4.2 GRADES + EXPLOR - uma realização

De 3.1 a 3.3 foi referido de forma sucinta, em que consiste uma interface gráfica e as ferramentas das quais se pode dispor para a realizar. No ponto 4.1 foi referido que a interface gráfica desenvolvida tinha um carácter generalista, sendo portanto possível a sua utilização para o desenvolvimento de outro produto dentro da mesma filosofia de construção.

Neste ponto vai-se fazer uma breve apresentação de um trabalho já realizado sob encomenda da EDP, e destinado ao desenho de esquemas de rede e de ajuda à exploração das mesmas.

Devido à maior complexidade do trabalho e ao modo como foi especificado, tornou-se necessário dividir o produto em duas partes distintas, apenas ligadas pela base de dados (GRADES+EXPLOR).

O sistema GRADES é constituído por uma série de programas, que vão desde a parte correspondente ao desenho de esquemas que usa toda a interface atrás descrita, até à validação de cartas, importação e exportação de ficheiros, criação de chaves de acesso e manipulação da base de dados, entre outros.

O sistema EXPLOR permite ao utilizador simular manobras sobre as redes e efectuar cálculos de trânsitos de potência e curto-circuitos sobre as mesmas.

Analisemos então separadamente os dois sistemas.

GRADES

O sistema GRADES é constituído por três grandes blocos, segundo a arquitectura seguinte (figura 4.5.1).

Cada bloco corresponde a uma série de programas sendo estritamente necessário a existência do ou dos blocos superiores para o funcionamento correcto de cada bloco.

Esta arquitectura ficou-se a dever às especificações fornecidas pela EDP. Destas podemos destacar as seguintes:

Configuração do sistema

Deverá ser possível o utilizador configurar o sistema que vai utilizar, assim, deverá poder seleccionar os drives em que vai trabalhar, as portas série em que serão ligados o traçador de gráficos e a mesa digitalizadora, definir o modo como se fará a comunicação entre o computador e os periféricos (baud rate, paridade, número de bits e stop bits), e finalmente deverá poder definir a velocidade do rato mais adequada à máquina que está a

utilizar.

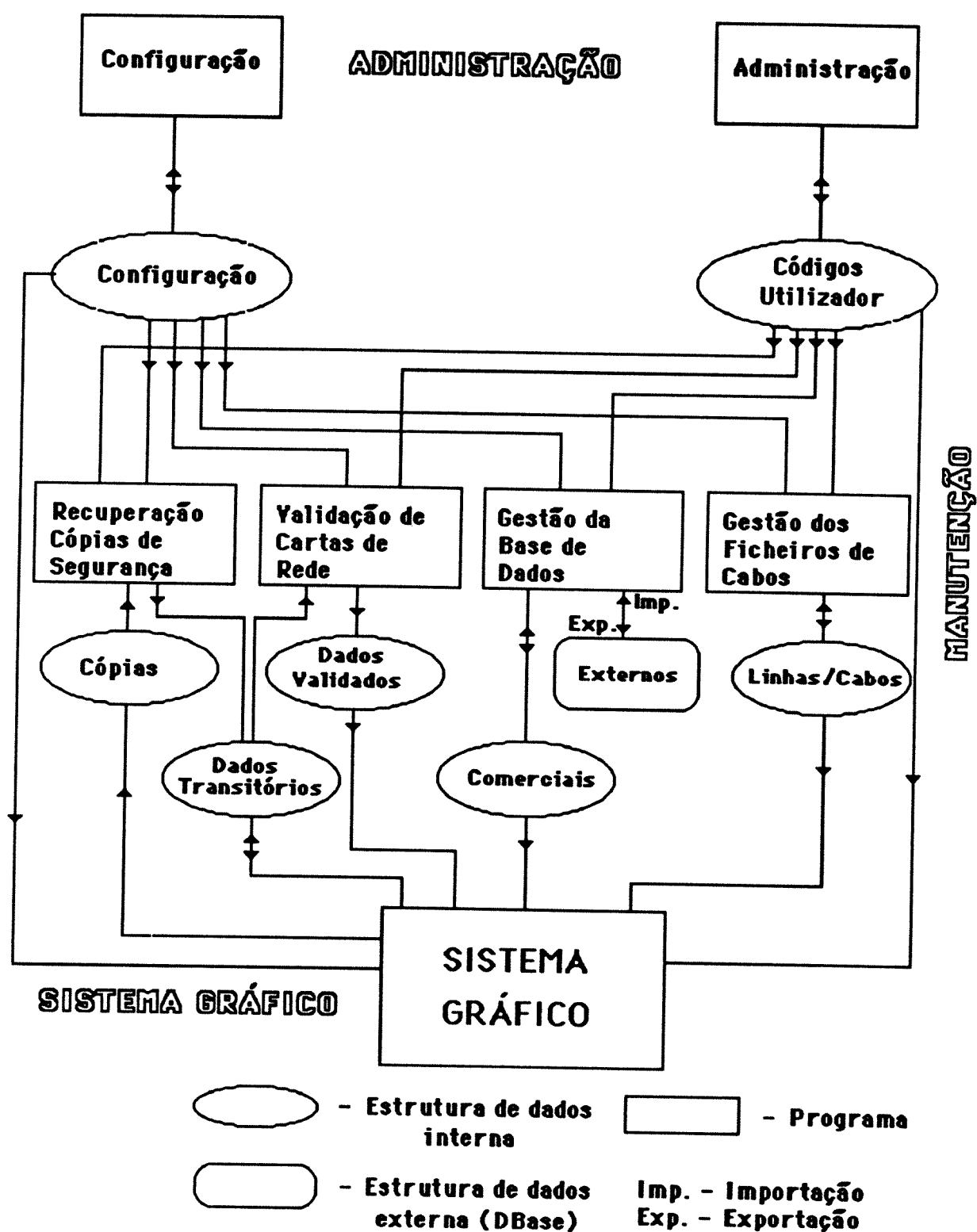


figura 4.5.1 - Arquitectura do sistema GRADES

Administração do sistema

Deverá ser possível criar e eliminar códigos para futuros utilizadores do sistema, devendo o acesso pleno ao sistema ser vedado a utilizadores sem código. Cada utilizador deverá poder criar e alterar a sua palavra chave sendo tal procedimento totalmente invisível a outros utilizadores (a introdução da palavra chave deverá ser feita sem eco para o monitor).

O ficheiro de utilizadores onde constam as palavras chaves deverá ser completamente criptografado. A cada utilizador deverá ser dado um nível de acesso ao sistema.

Deverá existir um programa independente para a criação do código para o administrador, ao qual só este tenha acesso.

Estes dois procedimentos constituem o *bloco de administração* e são fundamentais para o funcionamento dos outros blocos.

O *bloco de manutenção* engloba todos os procedimentos auxiliares de gestão da base de dados na qual assenta o sistema gráfico. Assim foi definido para os procedimentos auxiliares, que:

Validação de cartas de rede

Deverá ser desenvolvido um módulo ao qual só tenha acesso o chefe da exploração ou outro utilizador a quem tenha sido atribuído o mesmo nível, e que permita a validação de cartas de rede, acto que corresponde actualmente à rubrica na carta. Este procedimento deverá criar novos ficheiros relacionados com os dados das redes validadas, que no momento da validação deverão ser cópia fiel dos dados correspondentes à carta de rede transitória (antes da validação). A informação do código do utilizador que efectuou a validação deverá ficar armazenada para o caso de ser necessário atribuir responsabilidades.

Recuperação de cópias de segurança

Deverá ser criado um procedimento que permita a recuperação de cópias de segurança. A recuperação deverá poder ser geral ou efectuada carta a carta. A entrada neste módulo só será permitida a utilizadores de nível superior, visto que uma recuperação geral destruirá a informação existente.

Gestão da base de dados

Deverá ser desenvolvido um programa que permita que os ficheiros vindos dos serviços

comerciais, escritos em DBase possam ser transferidos para o sistema GRADES, de modo a que seja possível a leitura dos valores das energias activa e reactiva nas horas de ponta, cheio e vazio, do código de actividade do consumidor, da potência instalada e tomada, do seu nome e designação (directamente a partir do número de consumidor) e do número do posto de transformação. Assim não será necessário carregar estes dados a partir do teclado aquando da caracterização dos postos de transformação.

Deverá ainda ser possível a exportação de ficheiros do sistema GRADES, respeitantes às características dos componentes para ficheiros DBase, de modo a ser possível a sua utilização noutros sistemas informáticos da EDP.

Gestão dos ficheiros de cabos

Deverá ser criado um programa que permita a construção e alteração de um ficheiro de cabos e linhas aéreas. Estes serão codificados de modo a que, a partir do código e secção, se obtenham os dados relativos a resistências, indutâncias, capacidades e à corrente máxima admissível.

No ficheiro deverá constar o código do cabo, a sua designação e a indicação das tabelas onde poderão ser lidos os outros valores.

Mais pormenores sobre os programas que constituem os blocos de administração e manutenção podem encontrar-se nos manuais de utilização [15].

O sistema gráfico é constituído pelo programa de desenho de cartas sendo as especificações que presidiram à sua realização em tudo semelhantes às do ERG. Podemos no entanto fazer referência a duas ou três alterações de filosofia e referir as novas janelas desenvolvidas para as características, bem como a simbologia usada.

Zoom

Deverá ser possível, tal como no ERG, visualizar a carta completa. No entanto, deverá existir a possibilidade de ampliar duas ou quatro vezes determinadas zonas mais densas da rede de forma a ser possível uma mais fácil identificação dos componentes. Nestes modos de ampliação o utilizador poderá inserir características nos componentes visíveis.

Plotter

Deverá ser criado um módulo que permita a saída do desenho para um traçador de gráficos. O utilizador poderá escolher as cores das canetas a utilizar e indicar a designação da carta.

Aparelhagem

Relativamente à aparelhagem, vai ser possível desenhar mais que um aparelho em cada extremo da linha. O método a seguir será semelhante ao do ERG, mas agora haverá um deslocamento do aparelho, caso já esteja algum desenhado, quando se desenha um novo (no ERG o desenho de um aparelho implica o desaparecimento do anterior). O número máximo de aparelhos a desenhar será três.

Simbologia

Os símbolos a usar são os definidos pela EDP. Nas figuras 4.5.2 e 4.5.3 encontram-se desenhados o menu principal e os diversos desdobramentos, onde se pode verificar quais os símbolos usados.

Características

As janelas de características deverão ser as seguintes (figura 4.5.4, 4.5.5).

Para mais pormenores sobre o sistema gráfico pode ser consultado o respectivo manual de utilização [16] .

Falta referir, para terminar a abordagem sobre o GRADES, que os três blocos são geridos por um menu principal que faz o acesso a cada um dos diferentes programas [15] (figura 4.5.6).

/

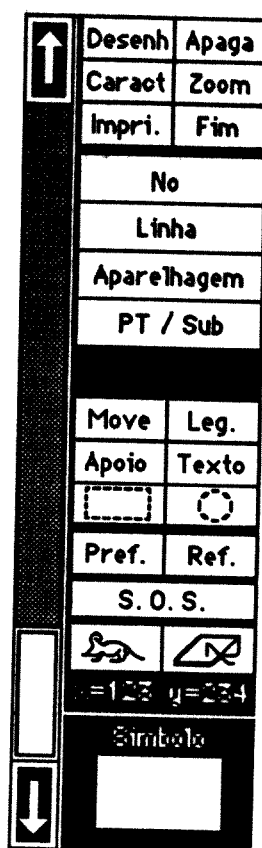


figura 4.5.2 - Menu Principal do módulo de desenho

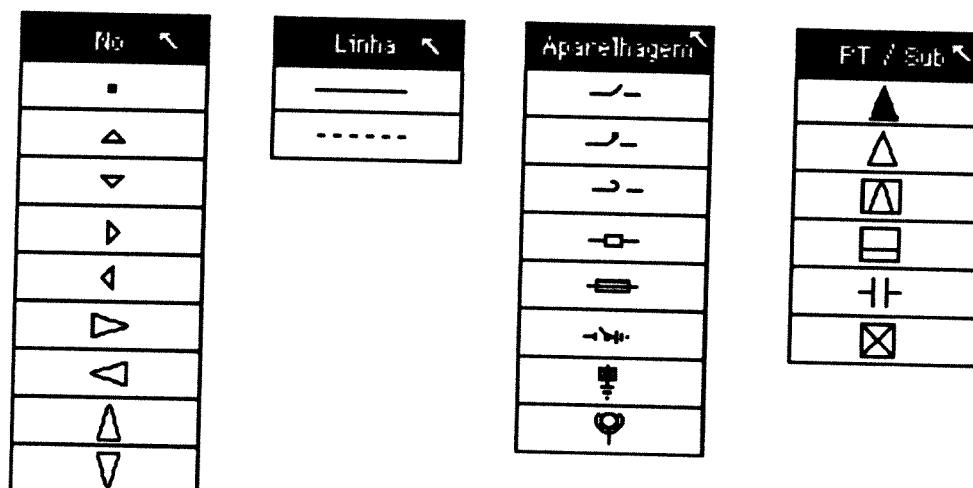


figura 4.5.3 - Desdobramentos do Menu Principal do módulo de desenho

PT/Subestação

N. do no

PT



Imprime

REGRESSAR

Codigo Comercial	_ _ _ _
Pot. Inst. (kVA)	_
Quadricula	
Funcao de Pt.	_
N. do Pt.	0
Pot. Contr. (kW)	_
Pot. Tom. (kW)	_
Codigo Actividade	_

Provisorio



Subestação

+ Imprime REGRESSAR	
Nome	_____
Pot. Inst. (kVA)	_____
Quadricula	_____
Tipo	_____
Codigo Concelho	_____
Regime de Neutro	_____
Bat. Cond. (kVAr)	_____
Tipo Assistencia	_____
REE	_____
N. telefone	_____ / _____
Provisorio ☐	

figura 4.5.4 - Janelas de características de PT/Subestação

LINHAS/CABOS

OK

CANCELAR

numero no ●

1111 C 1

numero no ○

1111 C 2

Imprime

Mais Dados

Linhas aéreas

Imprime

REGRESSAR

Cod. linha

TESTE-11-11-11

Comprimento (m)

—

Codigo A/S

A

N Cond./Fase

—

Ap. Corte No ●

1

Ap. Corte No ○

1

N. Apoio No ●

—

N. Apoio No ○

—

Codigo de Cabo

—

Seccao (mm2)

—

Seccao Cabo terra

—

Provisorio

☒

Cabos subterrâneos

Imprime

REGRESSAR

Cod. linha

TESTE-11-11-11

Comprimento (m)

—

Codigo A/S

S

N Cond./Fase

—

Ap. Corte No ●

1

Ap. Corte No ○

1

N. Apoio No ●

—

N. Apoio No ○

—

Codigo de Cabo

—

Seccao (mm2)

—

Provisorio

☒

figura 4.5.5 - Janela de características de linhas/cabos

GRADES

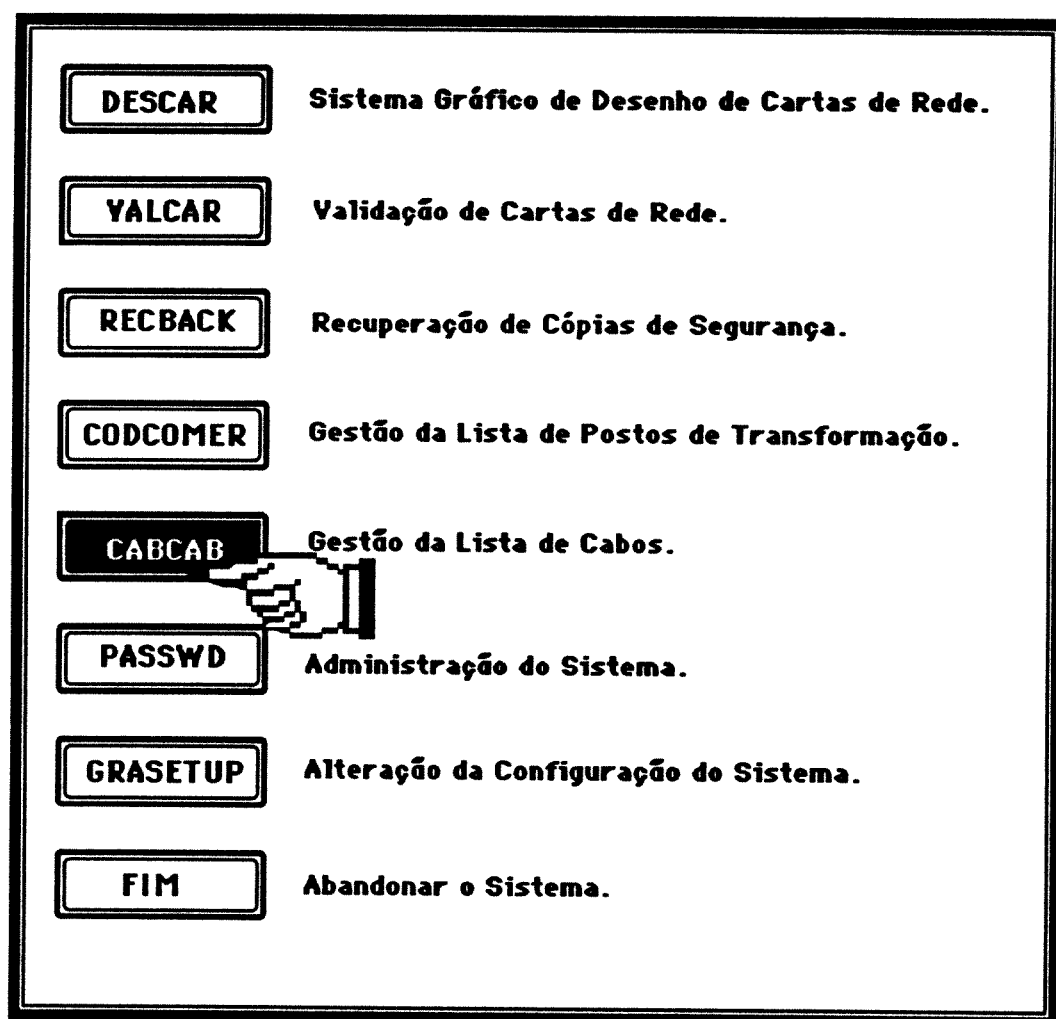


figura 4.5.6 - Menu Principal do sistema GRADES

EXPLOR

Este módulo foi desenvolvido especificamente para a condução (exploração) das redes que tenham sido previamente desenhadas, caracterizadas e validadas no sistema

GRADES.

Tal como no GRADES só utilizadores devidamente autorizados poderão entrar no sistema e manipulá-lo.

A interface criada é ligeiramente diferente da usada no GRADES, porque não pretendemos um sistema de desenho, mas um sistema que permita a condução das redes. Este sistema permite a manipulação e gravação dos diversos estudos em três níveis: base, real e pessoal. No nível base, a posição dos aparelhos de corte é a definida aquando do desenho de esquemas, sendo qualquer alteração de posição efectuada no EXPLOR automaticamente comunicada ao GRADES, de modo a ser efectuada a alteração na base de dados. No nível real, a posição dos aparelhos é a que se encontra implantada no terreno, ou seja, a topologia da rede presente no esquema é a configuração com que a rede se encontra a ser explorada. Os níveis pessoais comportam estudos efectuados sobre a rede pelos utilizadores, tendo cada utilizador os seus estudos guardados num arquivo próprio, identificado pelo seu código de utilizador.

Assim a janela de entrada é agora definida de modo diferente, sendo possível, além de seleccionar a carta, escolher o tipo de estudo (figura 4.5.7).

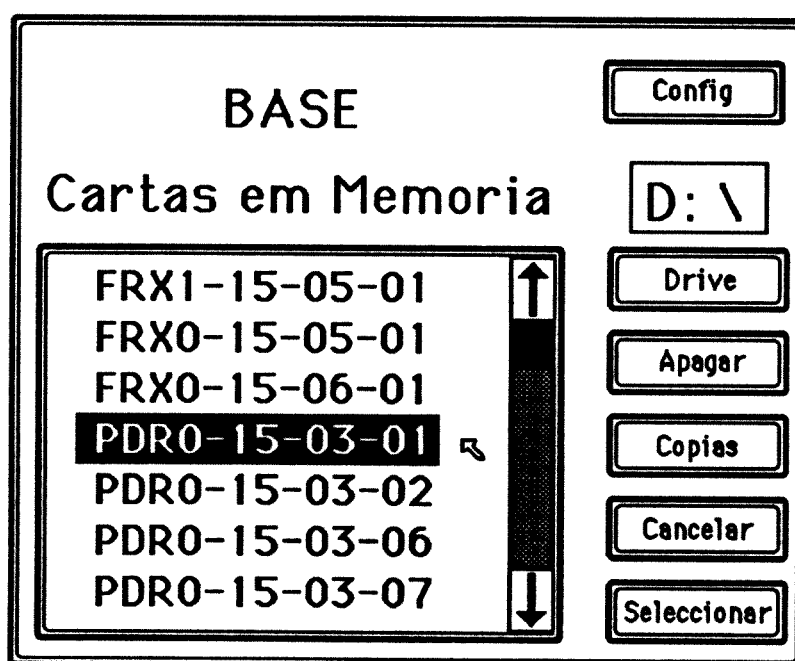


figura 4.5.7 - Janela de entrada do sistema EXPLOR

A partir do menu principal (figura 4.5.8) o utilizador poderá realizar diversas manobras, tais como: abrir e fechar aparelhos de corte das linhas e dos postos de transformação,

visualizar em qualquer instante a rede que se encontra ligada a um determinado nó, e qual a rede que se encontra sem tensão (desligada de qualquer subestação).

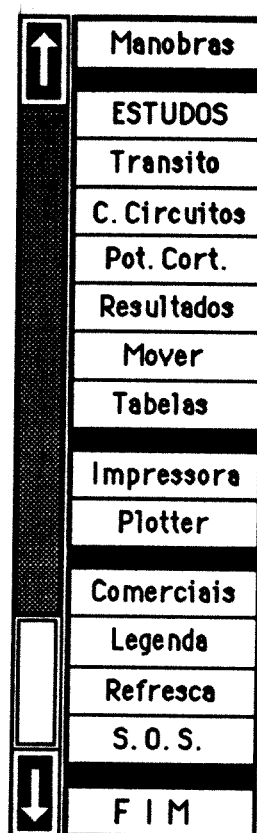


figura 4.5.8 - Menu principal do módulo de exploração

Relativamente aos estudos, o utilizador poderá realizar o cálculo de curto-circuitos simétricos e fase-terra, trânsitos de potência e índices de qualidade de serviço.

O cálculo de curto-circuitos é baseado no método das componentes simétricas [8,9], sendo portanto possível efectuar a simulação de qualquer curto-circuito. Apenas se fornecem os resultados do curto-circuito simétrico e do fase-terra, atendendo a que eram os únicos que constavam das especificações. O algoritmo de cálculo foi desenvolvido usando técnicas de esparsidade e de factorização de matrizes, de modo a aumentar a velocidade de cálculo e diminuir a memória utilizada.

O cálculo de trânsitos de potência foi baseado no método de Newton-Raphson, descrito no capítulo 2.

Atendendo a que na distribuição as redes são quase exclusivamente exploradas de forma radial, foi possível, quer para o cálculo dos curto-circuitos simétricos, quer para os trânsitos de potência, desenvolver um algoritmo específico que se traduz numa

diminuição de memória usada e num aumento de rapidez de saída de resultados. A descrição deste algoritmo alternativo implementado encontra-se no anexo 4.

Para a determinação do índice de qualidade de serviço foi simulada uma pequena máquina de calcular onde se vai efectuando o somatório dos produtos da potência cortada pelo tempo de interrupção. Para realizar estes cálculos bastará ao utilizador ir seleccionando os nodos que deixaram de estar alimentados, e introduzir o tempo durante o qual se verifica a interrupção.

Para finalizar, basta referir que os resultados dos estudos ou são afixados no esquema, sobre os diversos componentes (nodos e linhas), sendo possível deslocá-los, ou podem ser visualizados a partir de tabelas, contendo estas um maior volume de informação.

Sempre que se realiza um estudo, a rede poderá abranger mais que uma carta, sendo os cálculos efectuados para toda a rede e tendo o utilizador a possibilidade de ir visualizando a rede, bastando para tal ir seleccionando os nós de transição.

Para maior detalhe sobre o módulo EXPLOR pode ser consultado o respectivo manual de utilização [17].

Com esta abordagem mostra-se a generalidade do produto desenvolvido, visto conseguir-se efectuar dois trabalhos distintos. Um deles está já instalado e a funcionar na indústria, com base numa série de rotinas para desenho de interfaces baseadas no sistema ATEGA+MAKEFONT.

5. CONCLUSÕES

Após a abordagem realizada sobre redes eléctricas e redes de gás pode-se talvez agora fazer uma apreciação mais generalizada sobre ambas. Como se verificou existem bastantes aspectos comuns no estudo dos dois tipos de redes, tanto a nível de topologia como no modelo formal utilizado para cálculos sobre as mesmas.

A nível de topologia como se viu ambas são redes normalmente malhadas, existindo apenas diferença entre elas a nível da simbologia usada, sendo no entanto possível efectuar uma correspondência directa entre as características dos componentes dos dois tipos de redes.

Relativamente aos modelos usados para o cálculo das diversas variáveis do sistema, verificou-se também não existirem grandes diferenças. Ambos baseiam-se nas leis de Kirchhoff, principalmente na lei dos nós, resultam em sistemas não lineares e são resolvidos aplicando o método de Newton.

Devido às características dos sistemas, existem poucas ligações entre os diversos nós daí resultando que as matrizes calculadas são muito esparsas, sendo então possível, com os benefícios que se descreveram utilizar algoritmos mais ou menos sofisticados para tratamento da esparsidade e factorização de matrizes.

Finalmente, e completando o comentário ao estudo que se desenvolveu refira-se a interface gráfica. Como já foi dito as redes são em tudo semelhantes pelo que a interface gráfica, desenvolvida com um carácter geral, permite que com alterações de promenor seja utilizada para desenho e cálculo de qualquer tipo de rede. Unicamente haverá necessidade de criar novas fontes de símbolos.

Concluindo, verifica-se que o estudo pode ser alargado a outros tipos de redes que em princípio o tratamento será em tudo semelhante ao realizado, sendo possível o uso da mesma interface gráfica e dos mesmos algoritmos de cálculo, sendo todavia necessário alterar algumas expressões.

Como perspectivas futuras de desenvolvimento pode-se referir que seria de interesse, principalmente para as redes de transporte, modelizar os sistemas de modo a permitirem o cálculo em redes que envolvam duas ou mais pressões distintas. Recorrendo ao conhecimento para as redes eléctricas seria de interesse desenvolver um processo de redução de todos os componentes a uma mesma pressão, tal como numa rede eléctrica se trabalha numa só tensão (uso do sistema por unidade, pu).

Ainda dentro das redes de transporte seria de interesse modelizar os compressores de modo diferente, assim como modelizar outros tipos de compressores, como por exemplo, os que absorvem gás da rede para o seu funcionamento.

Noutro campo, pode-se sugerir a utilização do sistema desenvolvido como uma etapa de um problema de optimização que funcione como auxiliar ao projecto de redes de gás. Neste caso o sistema permitiria uma série de soluções entre as quais o projectista poderia optar.

Como se pode verificar o estudo de redes de gás está longe de estar terminado, constituindo um campo aberto a novas abordagens.

ANEXO 1

EQUAÇÕES DE ESCOAMENTO DE FLUIDOS EM CANALIZAÇÕES

O estado físico de um gás só é completamente determinado se forem conhecidos os seguintes parâmetros: temperatura, pressão e volume específico.

A temperatura do gás deverá ser expressa em Kelvin, sendo a conversão de °Celsius dada pela expressão

$$T = 273.15 + t \quad t - ^\circ\text{C}$$

A pressão p é definida como sendo a componente normal da força F exercida pelo gás por unidade de área, numa determinada região. A pressão é definida para um elemento de área suficientemente grande de modo a ser considerado como contínuo. Assim

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow \Delta A'} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

onde $\Delta A'$ é a mínima área para a qual o gás se comporta de forma contínua.

A pressão total exercida numa determinada superfície denomina-se pressão absoluta. À pressão exercida pelo ar, e que varia de região para região, chama-se pressão atmosférica.

À diferença entre a pressão absoluta e a pressão atmosférica chama-se pressão relativa.

Ao volume ocupado pela unidade de massa de um determinado gás dá-se o nome de volume específico v e o seu inverso é denominado densidade do gás ρ . O produto $\rho \cdot g$ é denominada peso específico (γ).

Uma propriedade importante dos gases é a sua viscosidade. A viscosidade é a resistência que o gás oferece ao movimento.

Para a caracterização das condições de fluxo é usado um factor dependente das propriedades do gás, da sua velocidade e do diâmetro da conduta. Esse factor é conhecido como o número de Reynolds e é definido como

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu}$$

onde:

D é o diâmetro interior da conduta (m)

v é a velocidade do gás (ms^{-1})

ρ é a densidade do gás (kg m^{-3})

μ é o coeficiente da viscosidade dinâmica (Nsm^{-2})

Em termos físicos

$$Re \approx \frac{\text{forças de inércia}}{\text{forças devidas à viscosidade}}$$

Atendendo às definições atrás dadas estamos em condições de escrever a equação de Bernoulli para um fluido ideal, incompressível e não viscoso.

Consideremos então uma partícula de fluido infinitesimal de secção transversal A , comprimento dx , velocidade v e aceleração a . As forças externas que actuam sobre a partícula são o seu próprio peso e a pressão. O fluido é considerado ideal.

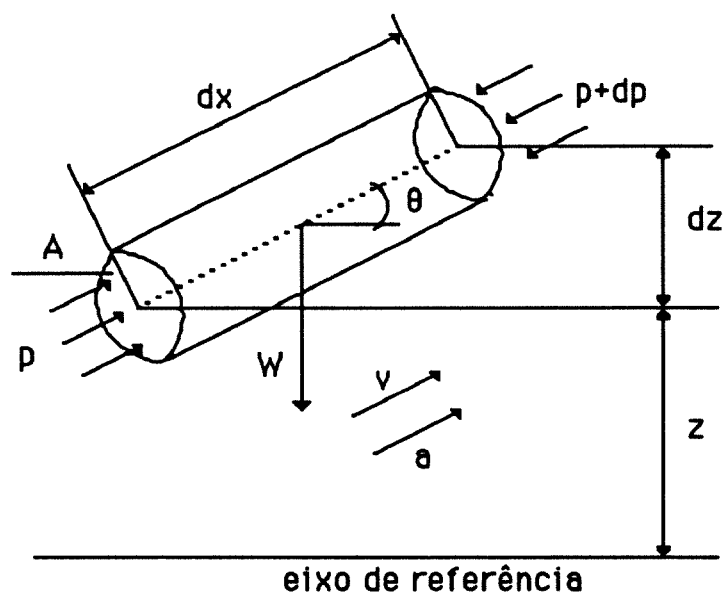


figura A1.1 - Representação de uma partícula infinitesimal de fluido

Considerando apenas a força na direcção do movimento, temos como resultante da força devido à pressão na extremidade da partícula,

$$pA - (p + dp) A = - dpA$$

sendo o sentido do movimento considerado positivo.

Para o peso W da partícula temos

$$W = A \, dx \, \rho \, g$$

onde

ρ é a densidade.

A componente segundo a direcção do movimento será então

$$-W \sin \theta = -(\rho \, g \, A \, dx) \frac{dz}{dx}$$

De acordo com a segunda lei de Newton a soma destas duas forças será igual ao produto da massa M pela aceleração a na direcção da força. Assim

$$\sum F = M \, a$$

sendo

$$M = \rho \, A \, dx$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \times \frac{dx}{dt} = \frac{dv}{dx} \times v$$

e

$$\sum F = -dp \, A - (\rho \, g \, A \, dx) \frac{dz}{dx}$$

Temos:

$$-dp \, A - (\rho \, g \, A \, dx) \frac{dz}{dx} = \rho \, A \, dx \times v \frac{dv}{dx}$$

Dividindo por $(\rho \, g \, A \, dx)$ obtemos:

$$-\frac{1}{\rho g} \frac{dp}{dx} - \frac{dz}{dx} = \frac{v}{g} \frac{dv}{dx}$$

ou seja

$$\frac{1}{\rho g} \frac{dp}{dx} + \frac{v}{g} \frac{dv}{dx} + \frac{dz}{dx} = 0 \quad (A1.1)$$

A equação A1.1 é conhecida como equação de Euler. No caso de um fluido incompressível em que a densidade se mantém constante, a equação de Euler pode ser integrada em ordem a x , obtendo-se

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = \text{constante} \quad (\text{A1.2})$$

A equação anterior não é mais que a equação de Bernoulli.

Multiplicando cada termo por g obtém-se:

$$gz + \frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \text{constante} \quad (\text{A1.3})$$

A equação A1.3 pode ser interpretada como uma equação de balanço de energia. O termo gz corresponde à energia potencial por unidade de massa. O segundo termo, $\frac{v^2}{2}$, é interpretado como sendo a energia cinética por unidade de massa, visto que a energia cinética é dada por $dm \frac{v^2}{2}$. Dividindo por dm obtém-se $\frac{v^2}{2}$.

O último termo, $\frac{p}{\rho}$, representa o trabalho efectuado pela unidade de massa do fluido devido à pressão a que está sujeito.

A soma destes três termos é constante e é denominada constante de Bernoulli.

Para um fluido real, será necessário efectuar algumas correcções à equação de Bernoulli, uma vez que ela traduz o princípio da conservação de energia aplicado ao regime estacionário de um fluido ideal, não viscoso e incompressível.

Aplicando agora a equação A1.2 a dois pontos de uma das linhas de circulação obtemos:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (\text{A1.4})$$

A equação A1.4 traduz o princípio da conservação de energia, ou seja, a energia total permanece constante ao longo de uma mesma linha de circulação.

Como se disse atrás, para os fluidos reais será necessário efectuar alguns ajustes. Assim, teremos que considerar as perdas de energia devido a atritos com as paredes das condutas, a choques de partículas, etc.

Logo, a energia total não será constante mas decrescerá na direcção e sentido do fluxo. A solução para contornar este pormenor passa por acrescentar mais um termo à equação A1.4, correspondente às perdas. A equação geral passará então a ser

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \text{perdas} \quad (\text{A1.5})$$

sendo o termo "perdas" positivo, o sentido do fluxo é de 1 para 2 e o termo de perdas será também expresso como uma energia por unidade de peso do fluido.

Em regime estacionário as perdas são causadas maioritariamente pela viscosidade do fluido. Os outros factores de perdas, por serem pouco influentes, são considerados nulos. As perdas correspondem então a uma conversão de energia mecânica em energia térmica, que é dissipada sob a forma de calor nas paredes das condutas.

Equação para o regime estacionário

As equações a que chegaremos neste ponto não são as únicas que podem ser utilizadas na análise em regime estacionário, uma vez que se torna bastante difícil contabilizar o efeito do atrito. Neste trabalho adoptou-se a equação de Darcy para o quantificar.

A equação geral para análise em regime estacionário do escoamento é obtida a partir da equação de Bernoulli.

Como se viu atrás, a pressão decresce ao longo de uma conduta no sentido do fluxo; assim também a densidade do gás diminui. Para o regime estacionário a massa mantém-se constante ao longo da conduta. Considerando a secção da conduta constante, a equação da continuidade diz--nos que:

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2 \quad (A1.6)$$

sendo ρ_1 e ρ_2 a densidade no ponto 1 e 2 e v_1 e v_2 as respectivas velocidades.

Se a densidade diminui de 1 para 2 então, forçosamente, a velocidade terá que aumentar. Uma parte da energia será a responsável por este aumento.

Atendendo à variação de velocidade, será necessário definir um elemento infinitesimal, de modo a ser possível obter as perdas totais após integração. Na figura A1.2 consideramos um elemento de comprimento dx pertencente a uma conduta de comprimento L , que está sujeito à pressão p no ponto x e à pressão $p+dp$ no ponto $x+dx$.

A densidade e a velocidade variam do mesmo modo em cada elemento dx , ao longo do comprimento L . Se considerarmos desprezável a variação de densidade no elemento dx , ou seja, se considerarmos que o elemento tem densidade constante a equação de Bernoulli tomará a forma:

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = \frac{p+dp}{\rho g} + \frac{(v+dv)^2}{2g} + (z+dz) + dh_f \quad (A1.7)$$

sendo

dh_f a energia de perdas devido ao atrito, por unidade de peso.

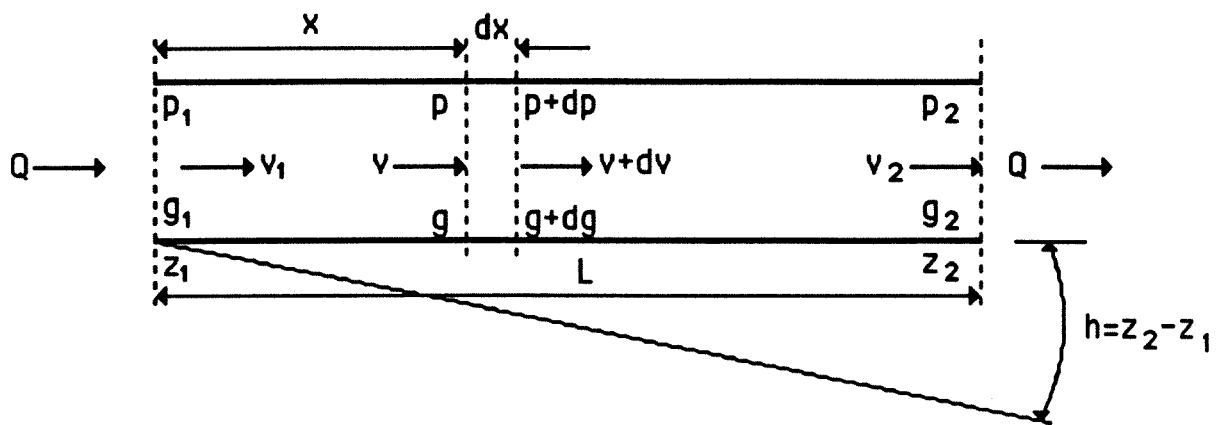


figura A1.2 - Representação de um elemento de comprimento dx pertencente a uma conduta de comprimento L

No elemento dx , consideraram-se desprezáveis as variações de energia cinética devidas a variação de densidade e velocidade.

Como já se referiu, o efeito do atrito será traduzido pela equação de Darcy

$$dh_f = \frac{4fv^2}{D2g} dx$$

onde:

f é o factor de atrito

D é o diâmetro interno da conduta.

Substituindo e simplificando, a equação A1.7 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$-\frac{dp}{\rho g} = \frac{4fv^2}{D2g} dx + dz$$

visto dv ser igual a zero.

Multiplicando ambos os termos por ρg obtém-se

$$-dp = \frac{4fv^2}{2D} \rho dx + \rho g dz \quad (A1.8)$$

Da equação da continuidade

$$\rho v = \rho_1 v_1 \quad v = \frac{\rho_1}{\rho} v_1$$

Uma vez que a energia térmica é totalmente libertada pelas paredes da conduta, pode-se considerar que não existe aumento de temperatura do fluido devido às perdas. Assim

$$\frac{p}{\rho} = \frac{p_1}{\rho_1}$$

donde

$$v = \frac{p_1}{p} v_1$$

e

$$\rho = \frac{p}{p_1} \rho_1$$

Substituindo em A1.8 ρ e v pelas expressões anteriores obtemos

$$-dp = \frac{2f}{D} \frac{v_1^2}{p^2} v_1^2 \frac{p}{p_1} \rho_1 dx + \frac{p}{p_1} \rho_1 g dz$$

Simplificando

$$-p dp = \frac{2f}{D} \rho_1 p_1 v_1^2 dx + \frac{p^2}{p_1} \rho_1 g dz \quad (A1.9)$$

Que é a equação de estado para os fluidos.

Como se sabe a equação dos gases perfeitos é

$$p \vartheta = R T$$

onde ϑ é o volume específico.

Se entrarmos com o factor de compressibilidade z para os gases não ideais, a equação transforma-se em

$$p \vartheta = z R T$$

e como

$$\vartheta = \frac{1}{\rho}$$

obtemos

$$p_1 = \rho_1 z R T$$

Substituindo em A1.9

$$-p \, dp = \frac{2f}{D} \rho_1^2 v_1^2 z R T \, dx + \frac{p^2}{zRT} g \, dz \quad (\text{A1.10})$$

Sendo A1.10 a equação de estado para o gás.

O termo $\frac{p^2}{zRT} g \, dz$ que aparece na expressão A1.10 devido à diferença de cota entre as duas extremidades da conduta, pode ser substituído por

$$\frac{p_m^2}{zRT} g \, dz$$

se considerarmos p como sendo o valor médio da pressão ao longo da conduta (p_m).

Definição:

Caudal é o volume de um fluido em movimento que atravessa uma secção transversal da conduta na unidade de tempo

$$Q = \frac{A \, x}{t} \quad (\text{m}^3\text{s}^{-1})$$

em que

Q é o caudal

A é a área da secção transversal da conduta

x é a distância percorrida.

Como

$$v = \frac{x}{t}$$

então

$$Q = A \, v$$

Se passarmos a considerar as condutas com secção circular a equação A1.6 transforma-se em

$$\rho_1^2 v_1^2 = \rho_n^2 v_n^2 = \rho_n^2 \frac{Q_n^2}{A^2} = \frac{\rho_n^2 Q_n^2}{(\pi \frac{D}{4})^2}$$

em que D é o diâmetro interno da conduta.

O índice n refere-se a condições normais de pressão e temperatura

$$p_n = 1 \text{ bar} \quad T_n = 288\text{K}$$

Assim

$$-p \, dp = \frac{32}{\pi^2} f \frac{\rho_n^2 Q_n^2}{D^5} z R T \, dx + \frac{p_m^2}{z R T} g \, dz \quad (\text{A1.11})$$

A constante R do gás pode ser relacionada com a constante R_{ar} que é a constante para o ar; para tal, considere-se o gás e o ar à temperatura T_n e à pressão p_n , e o factor de compressibilidade z unitário.

Para o gás

$$p_n = \rho_n R T_n$$

Para o ar

$$p_n = (\rho_{\text{ar}})_n R_{\text{ar}} T_n$$

$$\frac{\rho_n}{(\rho_{\text{ar}})_n} = \frac{R_{\text{ar}}}{R} = S$$

$$R = \frac{R_{\text{ar}}}{S}$$

sendo S a densidade do gás em relação ao ar.

Assim

$$\rho_n = \frac{p_n}{R T_n} = \frac{S p_n}{R_{\text{ar}} T_n}$$

Substituindo R e ρ na equação A1.11 obtém-se

$$-p \, dp = \frac{32}{\pi^2} f \frac{Q_n^2}{D^5} z \left(\frac{Sp_n}{R_{ar} T_n} \right)^2 \frac{R_{ar}}{S} T \, dx + \frac{p_m^2 S}{z R_{ar} T} g \, dz \quad (A1.12)$$

Simplificando

$$-p \, dp = \frac{32}{\pi^2} Q_n^2 \frac{f S z T}{R_{ar} D^5} \left(\frac{p_n}{T_n} \right)^2 dx + \frac{p_m^2 S}{z R_{ar} T} g \, dz \quad (A1.13)$$

Integrando A1.13 desde $x = 0$, $p = p_1$ até $x = L$, $p = p_2$ obtém-se

$$-\left(\frac{p_2^2 - p_1^2}{2} \right) = \frac{32}{\pi^2} Q_{12}^2 \frac{f S z T}{R_{ar} D^5} \left(\frac{p_n}{T_n} \right)^2 L + \frac{p_m^2 S}{z R_{ar} T} g h$$

Donde

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{64}{\pi^2} Q_{12}^2 \frac{f S z T}{R_{ar} D^5} \left(\frac{p_n}{T_n} \right)^2 L + 2 \frac{p_m^2 S}{z R_{ar} T} g h$$

Assim o fluxo Q_{12} será:

$$Q_{12} = \sqrt{\frac{\pi^2 R_{ar} T_n}{64 p_n}} \sqrt{\frac{\left\{ \left[(p_1 - p_2)^2 - \frac{2 p_m^2 S g h}{z R_{ar} T} \right] D^5 \right\}}{f S L T z}} \quad (A1.14)$$

A equação A1.14 é a equação geral para o escoamento em condutas de gás, sob certas condições:

- a) Regime estacionário;
- b) Escoamento isotérmico;
- c) Variação da energia cinética ao longo da conduta desprezável;
- d) Compressibilidade do gás constante ao longo da conduta;
- e) Validade da equação de Darcy-Weisbach para o coeficiente de atrito na conduta;
- f) Coeficiente de atrito constante para toda a conduta.

ANEXO 2

MÉTODOS DE RESOLUÇÃO DE FLUXOS ESTACIONÁRIOS DE GÁS EM REDES

Como se referiu no anexo 1, existem basicamente dois métodos para o cálculo das pressões nos nós e caudais nas condutas, baseados nas duas leis de Kirchhoff.

Vamos abordar neste anexo as suas vantagens e desvantagens assim como as de duas extensões a tais métodos. Finalmente, será descrito pormenorizadamente o método utilizado neste trabalho.

O método dos nós, baseado na primeira lei de Kirchhoff, é o de mais fácil implementação computacional e no qual a esparsidade da matriz jacobiana está directamente relacionada com a estrutura da rede. Atendendo a que normalmente um nó não estará ligado a mais que três ou quatro outros nós, então cada linha e coluna do jacobiano não terá mais que quatro ou cinco elementos não nulos.

A grande desvantagem do método dos nós é o facto de, se a solução inicial se afastar da solução do problema, o processo diverge. Mesmo que a solução esteja próxima da inicial, a convergência é bastante lenta, devido ao facto de as funções de erro conterem termos em raiz quadrada ou termos de expoente $\frac{1}{m_1}$ em que m_1 é igual a 1.848 ou 1.854.

O método das malhas, baseado na segunda lei de Kirchhoff, é um método com muito boas características de convergência, podendo a solução inicial ser próxima ou não da solução final. Em contrapartida, é um método que requer maior tempo de cálculo, porque é necessário identificar de modo claro as diversas malhas independentes existentes na rede. Existem diversos processos para a determinação das malhas, mas haverá que atender ao facto de que se as malhas não forem convenientemente escolhidas, fará com que a matriz jacobiana seja total ou parcialmente cheia. Estes factos são os principais inconvenientes do método das malhas visto o aumento do número de elementos não nulos do jacobiano corresponder a um aumento da memória necessária e do tempo de cálculo.

Como extensão a estes dois métodos, foram desenvolvidos os métodos nó-malha e o malha-nó. O primeiro destes métodos não é também eficiente, atendendo a que se consegue uma melhoria na convergência relativamente ao método dos nós, mas é necessário definir as diversas malhas, o que, como se referiu, é bastante moroso e requer algoritmos sofisticados. Para obter a formulação para os três métodos referenciados, consultar Osiadcz [2,3,4].

O método usado neste trabalho para resolução do problema das redes de gás foi o método malha-nó.

Este método, basicamente, resolve um sistema de equações para as malhas, isto é:

$$F(Q) = B[\phi(Q)] \quad (A2.1)$$

Se a cada fluxo de malha corresponder um fluxo igual no ramo da co_árvore que a fecha, então a equação (A2.1) pode ser escrita da seguinte forma :

$$F(Q_c) = B[\phi(Q)] \quad (A2.2)$$

onde

Q_c é o fluxo nos ramos da co-árvore.

A solução da equação para as malhas (A2.2) dará o valor dos caudais, que neste caso são os caudais nos ramos da co-árvore. Os caudais nos ramos da árvore podem ser obtidos a partir dos fluxos na co-árvore, sem ser necessário conhecer que ramos estão associados a determinada malha.

A equação

$$L = A_1 Q \quad (A2.3)$$

onde

A_1 é a matriz de incidência ramo-nó reduzida, pode ser desdobrada nos elementos da árvore e da co-árvore, ficando:

$$L = \begin{bmatrix} A_{1t} & A_{1c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_t \\ Q_c \end{bmatrix} \quad (A2.4)$$

onde

Q_t é o vector dos fluxos na árvore

Q_c é o vector dos fluxos na co-árvore.

A equação (A2.4) pode ser escrita na forma

$$L = A_{1t} Q_t + A_{1c} Q_c \quad (A2.5)$$

Rearranjando

$$Q_t = A_{1t}^{-1} (L - A_{1c} Q_c) \quad (A2.6)$$

A partir da equação (A2.6) vê-se que os fluxos nos ramos da árvore podem ser obtidos a partir dos fluxos nos ramos da co-árvore. Na prática, verifica-se que não é necessário calcular a inversa da matriz A_1 . Os fluxos nos ramos da árvore podem ser calculados a partir dos fluxos nos ramos da co-árvore, efectuando o cálculo desde os nós de ligação dos ramos da co-árvore até ao nó de referência, verificando sempre a primeira lei de Kirchhoff.

Se este método resolvesse a equação (A2.2) estávamos perante o mesmo problema que no método das malhas, ou seja, era necessário definir as malhas linearmente independentes da rede. Assim, o sistema de equações é transformado num sistema equivalente de equações nodais, que é resolvido para se obter as pressões nos nós. As pressões são usadas para calcular as correcções aos fluxos nos ramos da co-árvore e a partir destes obtém-se o fluxo nos ramos da árvore. O processo é repetido iterativamente até se obter a solução.

Desde que o método corrija, sucessivamente, os fluxos nos ramos da co-árvore, as características de convergência do método das malhas são mantidas. Por outro lado, como se resolve um sistema de equações nodais, a esparsidade é mantida no cálculo da matriz jacobiana e não é necessário calcular as malhas linearmente independentes da rede. A transformação das equações das malhas em equações nodais é feita expandindo o termo $\phi(Q)$ em série de Taylor, desprezando os termos de ordem superior à primeira

$$\phi(Q)^{K+1} = \phi(Q + \Delta Q)^K \approx \phi(Q)^K + R^K \Delta Q^K \quad (A2.7)$$

onde

ΔQ é o vector de correcções aos fluxos nos ramos.

Para duas iterações sucessivas, K e $K+1$, temos

$$Q^{K+1} = Q^K + \Delta Q^K = (Q + \Delta Q)^K \quad (A2.8)$$

O termo R é dado por

$$R = \frac{\delta\phi(Q)}{\delta(Q)} = \begin{bmatrix} \frac{d\phi_1}{dQ_1} & & & \\ & \frac{d\phi_2}{dQ_2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \frac{d\phi_{m-1}}{dQ_{m-1}} & \\ & & & & \frac{d\phi_m}{dQ_m} \end{bmatrix} \quad (A2.9)$$

onde

m é o número de ramos

$$\phi_K = \phi_K(Q_K)$$

A matriz R pode ser escrita na forma

$$R = \begin{bmatrix} R_t & 0 \\ 0 & R_c \end{bmatrix} \quad (A2.10)$$

onde

R_t é a matriz diagonal para os ramos de árvore

R_c é a matriz diagonal para os ramos da co-árvore.

Para o ramo K e a partir da equação (2.3)

$$\phi_K(Q_K) = S_K K_K (S_K Q_K)^{m_1} \quad (A2.11)$$

Então, o elemento da diagonal para o ramo K é dado por

$$R_{KK} = \frac{d\phi_K}{dQ_K} = m_1 S_K K_K (S_K Q_K)^{m_1-1} S_K \quad (A2.12)$$

$$= m_1 K_K (S_K Q_K)^{m_1-1} \quad (\text{para } S_K S_K = 1)$$

$$= m_1 K_K |Q_K|^{m_1-1} \quad (\text{para } S_K Q_K = |Q_K|)$$

Assim, verifica-se que os elementos da diagonal principal são sempre positivos.

Da equação

$$\Delta P = \phi(Q)$$

Substituindo ΔP na equação (A2.7) obtém-se

$$\Delta P^{K+1} = \Delta P^K + R^K \Delta Q^K \quad (A2.13)$$

e

$$\Delta Q^K = (R^K)^{-1} (\Delta P^{K+1} - \Delta P^K) \quad (A2.14)$$

Da equação

$$\Delta P = -A^T P$$

onde

A^T é a transposta da matriz de incidência ramo-nó
pode-se substituir ΔP^{K+1} em (A2.14) donde se obtém

$$\Delta Q^K = (R^K)^{-1} (-A^T P^{K+1} - \Delta P^K) \quad (A2.15)$$

Sabendo que , pela primeira lei de Kirchhoff, a soma dos fluxos em cada nó é nula, a equação (A2.5) pode ser desenvolvida em

$$L = A_{1t} Q_t^K + A_{1c} Q_c^K = A_{1t} Q_t^{K+1} + A_{1c} Q_c^{K+1} \quad (A2.16)$$

Substituindo agora Q^{K+1} pela equação (A2.8) vem

$$A_{1t} Q_t^K + A_{1c} Q_c^K = A_{1t} (Q_t^K + \Delta Q_t^K) + A_{1c} (Q_c^K + \Delta Q_c^K) \quad (A2.17)$$

Simplificando

$$A_{1t} \Delta Q_t^K + A_{1c} \Delta Q_c^K = 0 \quad (A2.18)$$

donde, atendendo à equação (A2.4) se obtém

$$A_1 \Delta Q^K = 0 \quad (A2.19)$$

Substituindo ΔQ^K a partir da equação (A2.15), obtém-se

$$A_1 (R^K)^{-1} (-A^T P^{K+1} - \Delta P^K) = 0 \quad (A2.20)$$

Se separarmos os nós de referência - nós em que é conhecida a pressão-, dos nós de carga, a expressão $A^T P$ pode ser escrita como

$$A^T P = \begin{bmatrix} A_1^T & A_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ - \\ P_2 \end{bmatrix} = A_1^T P_1 = A_2^T P_2 \quad (A2.21)$$

onde

P_1 é o vector das pressões a determinar nos nós carga

P_2 é o vector das pressões conhecidas (nós fonte).

Substituindo $A^T P$ pela equação (A2.21) na equação (A2.20) obtém-se

$$A_1 (R^K)^{-1} (-A_1^T P_1^{K+1} - A_2^T P_2^{K+1} - \Delta P_K) = 0 \quad (A2.22)$$

As pressões P_2 nos nós fonte são fixas, não variando de iteração para iteração, donde se pode escrever a equação (A2.22) como

$$-A_1 (R^K)^{-1} -A_1^T P_1^{K+1} = A_1 (R^K)^{-1} (\Delta P^K + A_2^T P_2) \quad (A2.23)$$

A expressão $-A_1 (R^K)^{-1} -A_1^T$ é a matriz nodal jacobiana (J).

Donde a equação (A2.23) se pode escrever

$$J P_1^{K+1} = A_1 (R^K)^{-1} (\Delta P^K + A_2^T P_2) \quad (A2.24)$$

Resolvendo a equação (A2.24) obtém-se as pressões nos nós carga.

As correcções aos fluxos nos ramos da co-árvore são calculados a partir da equação (A2.15)

$$\Delta Q_C^K = (R_C^K)^{-1} (-A_C^T P^{K+1} - \Delta P_C^K) \quad (A2.25)$$

onde

$$\dim \Delta P_C = N \times 1$$

N é o número de ramos da co-árvore.

Os novos valores para os fluxos nos ramos da co-árvore serão então

$$Q_C^{K+1} = Q_C^K + \Delta Q_C^K \quad (A2.26)$$

Os fluxos nos ramos da árvore são obtidos a partir dos fluxos nos ramos da co-árvore. O processo é repetido até que o erro cometido no cálculo dos fluxos nos ramos da co-árvore seja inferior a um determinado valor. Normalmente, usa-se a seguinte expressão para o erro:

$$\| \Delta Q_C \|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^N |\Delta Q_{C(i)}|^2} \leq 0.1E^{-4} \quad (A2.27)$$

onde

N é o número de ramos da co-árvore.

O método malha-nó, além das vantagens já apontadas, oferece ainda a possibilidade de introduzir, de modo relativamente fácil, alterações que proporcionam a inclusão no sistema de elementos não lineares, como válvulas, compressores, reguladores, etc.

As variáveis mais importantes associadas com as estações de compressão e com os reguladores são o caudal que por eles passa e as pressões de entrada e saída.

Sendo

P_1 a pressão de entrada

P_2 a pressão de saída

A restrição a satisfazer no caso dos compressores é:

$$P_1 < P_2$$

e nos reguladores

$$P_1 > P_2$$

Na modelização adoptada os compressores e reguladores são considerados sem perdas ou seja, o caudal que entra é igual ao que sai. A energia necessária para efectuar o aumento de pressão é fornecida externamente.

Podia-se também modelizar outro tipo de compressores nos quais a energia necessária ao aumento de pressão provinha do aproveitamento de uma pequena quantidade de gás que chega ao compressor. Todavia neste caso seria necessário alterar as equações que se seguem, visto o fluxo que chega não ser igual ao que sai, e a diferença está relacionada com a variação ao valor de pressão pretendido.

No caso das válvulas só dois estados são possíveis: o aberto e o fechado. Se numa rede existirem válvulas, o tratamento a efectuar é simples: bastará verificar o seu estado e, conforme seja fechado ou aberto, o ramo onde está inserida fará parte ou não da rede.

Voltando ao caso dos compressores e reguladores, se aplicarmos o método malha-nó, (como descrito anteriormente) bastará criar para estas estações nós auxiliares. Se se efectuar um corte entre os nós auxiliares, assumindo que o nó de saída é o nó de referência, ou seja, com pressão definida, então os valores das pressões nos nós carga podem ser determinados aplicando a equação

$$-A_1 (R^K)^{-1} A_{1*} P^{K+1} = A_1 (R^K)^{-1} (A_{2*}^T P_2 + \Delta P^K) \quad (A2.28)$$

onde

A_{1*} e A_{2*} são as matrizes de incidência já incluindo os nós auxiliares.

O termo $-A_1 (R^K)^{-1} A_{1*}$ será a nova matriz jacobiana (J_*) que ao contrário da anterior (A2.23) já não é simétrica. Fazendo a substituição, a equação (A2.28) toma a forma de:

$$J_* P^{K+1} = A_1 (R^K)^{-1} (A_{2*}^T P_2 + \Delta P^K) \quad (A2.29)$$

As correcções aos caudais nos ramos da co-árvore podem ser determinadas usando a equação

$$\Delta Q_C^K = (R_C^K)^{-1} (-A_{C*}^T P^{K+1} - \Delta P_C^K) \quad (A2.30)$$

mantendo-se constantes as restantes equações utilizadas no método malha-nó.

ANEXO 3

MÉTODOS DE CÁLCULO DE TRÂNSITOS DE POTÊNCIA EM REDES ELÉCTRICAS

Método de Gauss-Seidel

A partir de 2.16 podemos, facilmente, chegar ao algoritmo para a resolução iterativa do problema, assim:

$$E_i^P = \frac{\left\{ I_i - Y_{ik} E_1 - \sum_{k=2}^{i-1} Y_{ik} E_k^P - \sum_{k=i+1}^n Y_{ik} E_k^{P-1} \right\}}{Y_{ii}} \quad (A3.1)$$

onde

P é a ordem da iteração

E_1 é constante e é a tensão no barramento de referência

Falta só determinar o valor de I_i . Se além do barramento de referência (barramento 1) só existirem barramentos do tipo PQ, de 2.17 obtém-se:

$$I_i = \frac{P_i^{SP} - jQ_i^{SP}}{(E_i^*)^{P-1}} \quad (A3.2)$$

NOTA:

Deve-se usar sempre os valores mais actuais das tensões, daí que em A3.2 se use E_i^* calculado na iteração anterior.

No caso dos barramentos PV será necessário calcular Q_i , uma vez que não é especificado, pelo que na iteração P se calcula Q_i^{P-1} ficando então:

$$I_i^{P-1} = \sum_{k=1}^{i-1} Y_{ik} E_k^P + \sum_{k=1}^n Y_{ik} E_k^{P-1} \quad (A3.3)$$

$$Q_i^{P-1} = \text{Im} \left\{ E_i^{P-1} (I_i^{P-1})^* \right\} \quad (A3.4)$$

tendo em atenção, no final, corrigir o módulo da tensão para o valor especificado

$$(E_i^P)_f = \frac{E_i^P}{|E_i^P|} \cdot V_i^{SP} \quad (A3.5)$$

em que

$(E_i^P)_f$ é o valor final ou corrigido da tensão no nó i

O algoritmo termina quando a condição de erro for satisfeita. Este algoritmo é de boa convergência.

Método das impedâncias nodais

O algoritmo para este método é semelhante ao de Gauss-Seidel, sendo este, no entanto, desenvolvido para a matriz de impedâncias nodais (Z).

Como se viu no caso anterior, sendo o barramento 1 o de referência, a matriz Y podia ser invertida. Assim, partindo de 2.16 podemos escrever

$$\hat{I} = \hat{Y} \hat{E} \quad (A3.6)$$

onde

$$\hat{I}_k = I_k - Y_{k1} E_1$$

$\hat{Y}$ = Matriz Y sem a 1ª linha e a 1ª coluna (correspondente ao barramento de referência)

$\hat{E}$ = vector das tensões (de 2 a n)

e

$$\hat{E} = \hat{Y}^{-1} \hat{I} \quad (A3.7)$$

Como se viu, $\hat{Y}^{-1}$ existe e

$$\hat{Y}^{-1} = \hat{Z} \quad (A3.8)$$

donde

$$\hat{E} = \hat{Z} \hat{I} \quad (A3.9)$$

e

$$E_i = \sum_{k=2}^n \hat{Z}_{ik} \hat{I}_k, \quad i=2,3,\dots,n \quad (\text{A3.10})$$

De 2.16,

$$E_i = \sum_{k=2}^n \hat{Z}_{ik} (I_k - Y_{k1} E_1), \quad i=2,3,\dots,n \quad (\text{A3.11})$$

fazendo

$$C_i = \sum_{k=2}^n \hat{Z}_{ik} Y_{k1} \quad (\text{A3.12})$$

em que C_i é constante para o barramento i , obtém-se

$$E_i = \sum_{k=2}^n \hat{Z}_{ik} I_k - C_i E_i, \quad i=2,3,\dots,n \quad (\text{A3.13})$$

Tal como no método anterior, I_i , para os barramentos PQ, será dado pela expressão A3.2, sendo agora, para os PV, utilizada a expressão:

$$I_i = \frac{E_i - \sum_{k=2}^{i-1} \hat{Z}_{ik} I_k - \sum_{k=i+1}^n \hat{Z}_{ik} I_k + C_i E_i}{\hat{Z}_{ii}} \quad (\text{A3.14})$$

e o valor de Q_i dado por A3.4.

Tal como no método anterior, em cada iteração utilizam-se os valores disponíveis mais actuais. Falta ainda, definir para os barramentos PV o valor de arranque para a corrente $I_i^{(0)}$. Normalmente usa-se a expressão

$$I_i^{(0)} = \frac{P_i^{SP}}{E_i^*} \quad (\text{A3.15})$$

Tal como no outro método, o algoritmo termina quando a condição de erro for satisfeita.

ANEXO 4

ALGORITMO PARA O CÁLCULO DE TRÂNSITOS DE POTÊNCIA E CURTO-CIRCUITOS EM REDES ELÉCTRICAS RADIAIS

O algoritmo desenvolvido [11] tem por objectivo, partindo da estrutura específica das redes radiais, ser um algoritmo de implementação simples em que o tempo de execução e a ocupação de memória são relativamente pequenos dando boas garantias de convergência. Quando comparado com o método de Newton-Raphson, podemos dizer que apesar do número de iterações aumentar, o tempo por iteração é substancialmente menor, dando como resultado final um tempo inferior de cálculo. No que respeita à memória utilizada neste algoritmo, é incomparavelmente menor.

O algoritmo foi desenvolvido exclusivamente para redes radiais que devem ser representadas como uma árvore ligada com numeração em pré-ordem, (figura A4.1), considerando o nó 1 a fonte (barramento de referência).

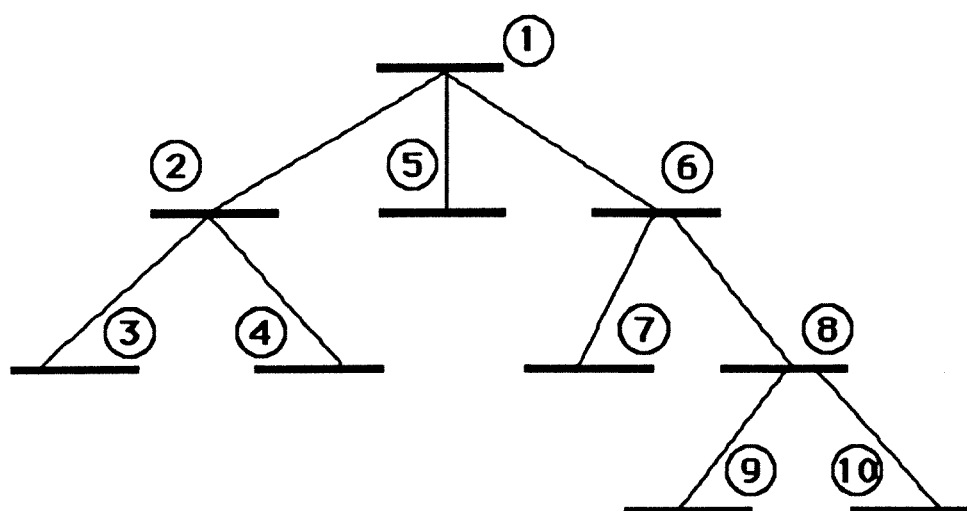


figura A4.1- Representação de uma estrutura em árvore com numeração em pré-ordem

Deverá ser guardada a indicação do antecessor de cada nó.

Representada a rede desta forma, a fase seguinte é definir qual o método usado para o cálculo das tensões (módulo e fase) nos diversos barramentos.

Uma das bases do método é considerar que a carga ou o produtor ligados a um barramento k podem ser representados como um bipolo do seguinte tipo (figura A4.2):

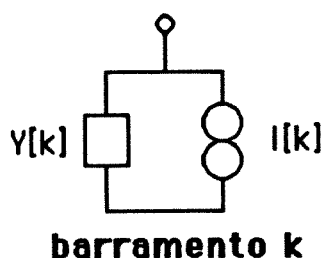


figura A4.2 - Bipolo

onde

$I[k]$ é nulo para os consumidores passivos, e conhecido (implícita ou explicitamente) em amplitude e fase para os produtores.

$y[k]$ é conhecido tanto para os consumidores como para os produtores.

No caso de barramentos consumidores podemos definir:

consumidores de impedância: consumidores onde é conhecida a impedância $R+jX$.

Então

$$Y[k] = \frac{1}{R+jX} + jB_0$$

onde

B_0 é a susceptância (capacidade no nó)

consumidores PQ: consumidores onde é especificada a potência $S=P+jQ$.

Então

$$Y[k] = \frac{P-jQ}{|V[k]|^2} + jB_0$$

onde

B_0 é a susceptância (capacidade no nó)

A admitância varia inversamente com $|V[k]|^2$.

consumidores PV: consumidores onde é especificada a potência activa e o módulo da tensão. Neste caso não é fácil definir directamente o valor de

$Y[k]$ que traduz a propriedade destes nós. Podemos no entanto calcular a potência reactiva injectada, Q , usando a tensão no nó, módulo e fase. A partir daqui transforma-se num nó PQ. No final de cada iteração mantêm-se os argumentos calculados para os barramentos PV, e impõe-se para o módulo da tensão o valor especificado.

$$Q[k]^{m+1} = -\text{Im} \left\{ |V[k]| |\underline{\delta}[k]|^m \sum_{i \neq k} y_{ki} (|V[k]| |\underline{\delta}[k]|^m - E[i]^m) \right\}$$

onde

$|\underline{\delta}[k]|$ é o argumento da tensão

y_{ki} é a impedância que liga o nó k ao nó i

$E[i]$ é a tensão no nó i (módulo e fase)

O algoritmo, que será iterativo, é composto por duas fases distintas às quais chamamos fase de descida e fase de subida.

subida: nesta fase calcula-se para cada nó k o novo valor de $Y[k]$ que representa a admitância equivalente da subárvore da qual k é raiz (incluindo o barramento k , mas excluindo a admitância da linha que liga k ao seu antecessor, representada por $l[k]$). Este cálculo efectua-se das "folhas" (nós terminais) para a raiz da árvore, juntando para cada nó k a sua contribuição para o valor de Y do seu antecessor ($k \neq$ raiz). Para juntar a contribuição do barramento k ao barramento antecessor $a[k]$ temos

$$Y[a[k]] = \frac{Y[k]}{1 + Y[k] l[k]}$$

em que

$Y[k]$ representa já toda a subárvore de que k é a raiz pois inclui as contribuições dos descendentes de k .

descida: uma vez calculado $Y[\text{raiz}]$ e conhecendo-se o valor de $V[\text{raiz}]$, a árvore é percorrida em sentido inverso (da raiz para as "folhas") calculando as tensões em cada nó visitado.

Para o cálculo de $V[k]$ partimos do valor de $V[a[k]]$. Como tal temos:

$$V[k] = \frac{V[a[k]]}{1 + Y[k] l[k]}$$

Da descrição das duas fases, constatamos que ao efectuar a subida podemos guardar o valor de $1 + Y[k] l[k]$ em vez de $Y[k]$ uma vez que este valor não mais será necessário.

O algoritmo terminará quando estiver satisfeita a condição de erro, que será a mesma do método de Newton-Raphson, descrito no capítulo 2.

Observação para as redes de gás

Um algoritmo em tudo análogo pode ser construído para redes radiais de gás. Dada a especificação dos caudais nos nós e da pressão no nó fonte (e em nós do tipo compressor modelizados sem perdas) este algoritmo resolveria o problema em uma única iteração (compreendendo uma subida e uma descida).

BIBLIOGRAFIA

- [1] STREETER, Victor L. e WYLIE, E. Benjamin
Fluid Mechanics, Mc Graw-Hill, 5ª edição, 1988
 - [2] OSIADACZ, Andrzej J.
Simulation and Analysis of Gas Networks, Gulf Publishing Company, 1987
 - [3] OSIADACZ, Andrzej J. e PIENKOSZ, Krzysztof
"Methods of steady-state simulation for gas networks", *INT. J. SYSTEMS SCI*,
1988, vol.19, nº 7
 - [4] OSIADACZ, Andrzej J.
"Comparison of numerical methods for steady-state simulation for gas networks",
CIV. ENGG SYST, March 1988, vol 5
 - [5] DAUGHERTY, Robert e FRANZINI, Joseph B. e FIMNEMORE, E. John
Fluid Mechanics with Engineering Application, Mc Graw-Hill
 - [6] KUSIC, George L.
Computer-Aided Power Systems Analysis, Prentice-Hall, 1986
 - [7] STAGG, Glen e EL-ABIAD, Ahmed H.
Computer Methods in Power Systems Analysis, Mc Graw-Hill, 1986
 - [8] PAI, M. A.
Computer Techniques in Power Systems Analysis, Mc Graw-Hill, 2ª edição, 1982
 - [9] ELGERD, Olle I.
Introdução à teoria de sistemas de energia eléctrica, Mc Graw-Hill, 1976
 - [10] GOUVEIA, J. Borges e SILVA, J. Pereira e MATOS, M. Costa
Fluxo de Cargas, Secção de PTDE, FEUP, 1979
-

- [11] MATOS, Armando B. e OLIVEIRA, M. Ferreira
Algoritmo para análise de redes eléctricas radiais
- [12] NEWMAN, William M. e SPROULL, Robert F.
Principles of Interactive Computer Graphics, vol I,II,Mc Graw-Hill,7ª edição,1982
- [13] WISMER, David A. e CHATTERGY, R.
Introduction to Nonlinear Optimization A Problem Solving Approach,
Elsevier North Holland Inc, 2ª edição, 1979
- [14] ALVES, J. Carlos e MATOS, J. Silva
"ATEGA - Software Gráfico para o Controlador EGA",
2º Encontro Português de Computação Gráfica, 19-20 OUT 1989
- [15] GRADES - *Módulos Complementares Manuais de Utilização*, INESC 1990
- [16] GRADES - *Módulo de Desenho Manual de Utilização*, INESC 1990
- [17] EXPLOR - *Módulo de Exploração Manual de Utilização*, INESC 1990
- [18] BRAMELLER, A. e ALLAN, R. N. e HAMAM, Y. M.
Sparsity, Pitman Ltd, 1976

