
Cálculo de Redes de Água com a Utilização Prática da Fórmula Universal de Perda de Carga.

LUIZ ALBERTO MAKTAS MEICHES

RESUMO

Este trabalho visa a apresentação de um método rápido e preciso para o cálculo da perda de carga em canalizações de redes de água. A P-NB-591/77 indica as limitações das fórmulas empíricas de perda de carga e aconselha o uso da fórmula Universal. No entanto, para que esta seja utilizada, é usual a utilização de tabelas próprias para a determinação do coeficiente de perda de carga, procedimento este bastante lento e incômodo para o engenheiro que tenta mecanizar seus cálculos. Nesta monografia está apresentada uma sistemática para a elaboração de uma programação (baseada em um processo iterativo), que possa ser inserido em calculadoras programáveis, máquinas estas cujo uso já está bastante difundido entre os projetistas e que, em questão de segundos, poderão fornecer o valor da perda de carga, tornando o cálculo muito mais rápido e dinâmico.

É apresentado também um exemplo de aplicação para o dimensionamento de uma rede de água. Preferiu-se, por simplicidade, a escolha de uma rede ramificada, ou malhada transformada em ramificada por um processo de seccionamento, característica das redes de comunidades de pequeno porte. Como ilustração, está apresentada a impressão desta programação, através da calculadora HP-97.

Como comentário final deste resumo, esta programação pode ser adaptada a diversos outros tipos e modelos de calculadoras, e o processo do cálculo da perda de carga pode ser inserido em qualquer outro método de projeto de rede de água.

I. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo a apresentação de um método que possibilite ao engenheiro um cálculo rápido, mecânico e preciso da perda de carga num conduto forçado, sem que haja necessidade de se recorrer a tabelas. Em seguida, será apresentada uma aplicação deste processo, para o cálculo de redes de água ramificadas ou transformadas por um método de seccionamento, quando malhadas, em redes ramificadas.

II. INTRODUÇÃO

A idéia da apresentação desta monografia surgiu quando do projeto de redes de água para comunidades de pequeno porte, onde, em geral, as redes são ramificadas ou de malhas elementares. Para estas cidades, o processo de cálculo mais conveniente é o direto, ou então, usa-se um método do seccionamento para transformar a rede em ramificada para fins de cálculo apenas. Outros processos, como o Método

de Cross, do círculo, etc, acabam por se tornar bastante trabalhosos para redes não muito extensas e simples. Pela simplicidade e rapidez, preferiu-se a utilização do Método do Seccionamento, cuja única dificuldade é o cálculo e balanceamento das perdas de carga. Há dois modos para se contornar este problema: o primeiro é a utilização de tabelas das fórmulas de resistência, processo bastante lento e incômodo para quem normalmente tenta mecanizar seus cálculos, com a utilização de calculadoras programáveis; o segundo, é buscar uma sistemática ou programação a ser inserida dentro da máquina de calcular, de forma a tornar rápido o cálculo.

À primeira vista, esta programação parece bastante fácil, pelo grande número de fórmulas simples para o cálculo da perda de carga. Mas, analisando o ítem 5, constante do apêndice I da P-NB-591/77, observa-se as limitações das fórmulas empíricas de perda de carga. Diz a norma que, com exceção talvez da fórmula de resistência dada a Flamant (para número de Reynolds menor que 10^5), as outras fórmulas são mais ou menos incorretas. A incorreção destas fórmulas é tanto maior quanto mais amplo é o domínio de aplicação pretendido por seus autores. Entre as fórmulas com domínios de aplicação bastante am-

plas, destaca-se a de Hazen - Williams e, entre as fórmulas de domínio de aplicação mais restritas, destaca-se a de Manning - Strickler.

Para melhores resultados, o ideal é a utilização da fórmula Universal de perda de carga, cujo uso depende do coeficiente f de perda de carga. Este, para ser obtido, ou lança-se mão de tabelas próprias de cálculo (ver as da norma), ou deve-se fazer um cálculo iterativo, que torna bastante complexa a programação citada anteriormente. É, exatamente a apresentação de uma sistemática precisa para possibilitar o uso prático da fórmula Universal de perda de carga, o objetivo deste trabalho.

III. CONCEITOS TEÓRICOS

De forma bastante rápida, serão apresentados alguns conceitos sobre o escoamento em condutos forçados. Não é intenção deste trabalho fazer grandes generalizações, tornando-o um tratado de Hidráulica. O objetivo é o cálculo de redes de água; por isto idéias serão dirigidas a condutos cilíndricos normalmente encontrados no mercado.

Assim, supondo-se que o regime de escoamento em tal conduto esteja estabelecido, vem que a trajetória média das "partículas" de água são paralelas às geratrizes dos condutos, a repartição das pressões médias é hidrostática em uma mesma seção, os coeficientes de energia cinética α e da quantidade de movimento β são os mesmos ao longo de toda a extensão do conduto, de tal sorte que a perda de carga H entre duas seções, distantes de L , é igual à diferença das cargas piezométricas nas duas seções, é dada por:

$$H = \frac{4 \tau_0}{\gamma} \frac{L}{D}$$

Sabendo-se que a tensão tangencial na parede é dada por:

$$\tau_0 = C_f \gamma \frac{V^2}{2g}$$

vem:

$$H = 4 C_f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

que é a expressão da Fórmula Universal de Perda de Carga, onde:

$$f = 4 C_f \text{ e } f = f(\mathcal{R}, \frac{K}{D})$$

\mathcal{R} número de Reynolds
K rugosidade equivalente (ver adiante)
D diâmetro de tubulação
$\frac{K}{D}$ rugosidade relativa

Muitas experiências foram realizadas para se considerar a influência deste coeficiente f . Resumindo-as em breves palavras, constatou-se junto às paredes dos condutos, uma camada extremamente delgada, onde o regime de escoamento é laminar, recebendo o nome de filme laminar. Para baixos números de Reynolds, esta camada cobre todas as asperezas da parede do conduto. O movimento é todo laminar e f acaba dependendo apenas do número de Reynolds \mathcal{R} . À medida que o movimento torna-se mais turbulento, o filme laminar vai diminuindo e os "dentes" das asperezas acabam por ficar fora da camada laminar. Neste caso, f depende da rugosidade relativa e do número de Reynolds, até que este cresça de tal forma, que o filme laminar fique dessa maneira muito estreito, praticamente desaparecendo a camada laminar, com os "dentes" das asperezas totalmente na região turbulenta, e f passa a depender somente da rugosidade relativa das paredes do conduto. Em rapidíssimas pinceladas, é este mecanismo que define os regimes de escoamento laminar, de transição, os hidraulicamente liso e rugoso, e que são cuidadosamente explicados quando se estuda as experiências de Nikuradse. Estes resultados são qualitativamente aplicáveis aos condutos em que as asperezas de suas paredes não são de dimensões uniformes e nem uniformemente distribuídos, como acontece nos condutos industriais. A fim de caracterizar as asperezas com uma dimensão linear, Colebrook criou a noção de rugosidade equivalente K , uma dimensão linear média das asperezas para cada tipo de material fabricado.

Sendo possível, então, caracterizar cada tipo de aspereza por uma rugosidade uniforme equivalente K , pode-se construir para os condutos industriais uma função geral da rugosidade, do tipo:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log_{10} \frac{D}{2K} = 1,74 - 2 \log_{10} \left[1 + 18,7 \frac{D/2K}{\mathcal{R}\sqrt{f}} \right]$$

Para as aplicações, esta fórmula é convertida em:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(0,27 \frac{K}{D} + \frac{2,51}{\mathcal{R}\sqrt{f}} \right)$$

conhecida como fórmula de Colebrook, onde os símbolos usados são os mesmos já vistos anteriormente.

Antes do aparecimento das calculadoras programáveis, esta equação era resolvida com o auxílio do diagrama de Moody-Rouse ou outros semelhantes.

Na prática, o valor da rugosidade uniforme equivalente depende do processo de fabricação dos tubos, da natureza do líquido que escoar nos condutos e do tempo em serviço dos condutos. Os tubos fabricados por um mesmo processo apresentam, em geral, o mesmo valor da rugosidade uniforme equivalente, o qual é independente do diâmetro do tubo.

IV. DESCRIÇÃO DO MÉTODO

Este trabalho objetiva o cálculo de redes de água. Logo, o processo a ser descrito abaixo vai pressupor que se conheça o diâmetro D do conduto do trecho de rede que se está estudando, bem como a razão Q , que passa por este conduto. A partir desses elementos e utilizando calculadoras programáveis, visou-se calcular a perda de carga usando a fórmula universal.

O método de cálculo supõe o escoamento isotérmico que se realiza em um conduto forçado longo cilíndrico, de seção circular, de rugosidade equivalente K e de comprimento L . O fluido é conhecido através da sua viscosidade γ .

Após obtidos os valores de \mathcal{R} e K/D , calcula-se $x = 1/\sqrt{f}$, admitindo-se um valor x_0 , e calcula-se o valor de x a partir do desenvolvimento da função:

$$F(x) = x + 2 \log_{10} \left(0,27 \frac{K}{D} + \frac{2,51}{\mathcal{R}x} \right) = 0$$

Pela fórmula de Taylor, até o segundo termo (Método de Newton Raphson), vem:

$$F(x) = F(x_0) + F'(x_0) dx = 0$$

$$\text{com } F'(x_0) \neq 0 \text{ e } dx = x - x_0$$

Portanto:

$$x = x_0 - \frac{F(x_0)}{F'(x_0)}$$

De onde se tira a fórmula de recorrência:

$$x_n = x_0 \cdot \frac{x_0 + 2 \log \left(0,27 \frac{K}{D} + (2,51/R_n) \cdot x_0 \right)}{5,02}$$

$$1 + \frac{5,02}{(0,27 \cdot K/D \cdot R_n + 2,51 x_0) x_n^{10}}$$

Adotando-se um valor de x_0 , calcula-se um novo valor de x . Fazendo-se o valor de x , o novo valor de x_0 , vai se calculando valores de x , até que a diferença entre estes valores seja suficientemente pequena. Para este trabalho, adotou-se uma diferença entre estes valores menor ou igual a 0,2%. Com o valor final de x , calcula-se o valor de f , tal que $f = \frac{1}{x^2}$.

Todo este procedimento é melhor aclarado no diagrama de blocos (anexo I).

Para uma melhor aproximação, são apresentados os valores de x_0 que devem ser utilizados para início de iteração (ver * Observação ao final da tabela).

- Para D = 13 mm $x_0 = 3$
- Para D = 19 mm $x_0 = 3$
- Para D = 25 mm $x_0 = 3$
- Para D = 32 mm $x_0 = 3$
- Para D = 38 mm $x_0 = 3$
- Para D = 50 mm $x_0 = 3$
- Para $p/Q < 0,05$ D/S ou $x_0 = 4$
- Para D = 63 mm $x_0 = 4$
- Para D = 75 mm $x_0 = 4$
- Para D = 100 mm $x_0 = 5$
- Para D = 125 mm $x_0 = 5$
- Para D = 150 mm $x_0 = 5$
- Para D = 200 mm $x_0 = 5$
- Para D = 250 mm $x_0 = 5$
- Para D = 300 mm $x_0 = 5$
- Para D = 350 mm $x_0 = 5$
- Para D = 400 mm $x_0 = 5$
- Para D = 450 mm $x_0 = 5$
- Para D = 500 mm $x_0 = 5$

* Observação: estes valores de x_0 são os valores apropriados para o início do processo iterativo, que se realizará no processamento para o cálculo do coeficiente f . Foram obtidos através de tentativas que se desenvolveram quando dos testes da programação que será apresentada mais adiante, de tal forma que as iterações se realizassem com rapidez e segurança, e de maneira que um cálculo com um

valor inicial muito baixo não conduziu a valores negativos e que pudessem levar a erros na seqüência das operações de cálculo, como por exemplo, um logarítmo negativo.

V. APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO ACIMA DESCRITO PARA UMA PROGRAMAÇÃO DO MÉTODO DO SECCIONAMENTO PARA O CÁLCULO DE REDES DE ÁGUA.*

Para este trabalho, foi utilizada a calculadora HP - 97. No entanto, esta programação pode ser facilmente adaptada à outra máquina de calcular ou computadores, seguindo-se o diagrama de blocos apresentado no anexo I.

Esta programação visa o cálculo de uma rede de água ramificada ou uma rede malhada simples transformada em ramificada por um método de seccionamento. Não se irá discutir muito sobre este método. Cabe apenas lembrar a seqüência de procedimentos, antes de se começar o cálculo. Tendo-se a projeção de população para o ano base de projeto, os coeficientes do dia de maior consumo e da hora de maior consumo, o consumo per capita, calcula-se a vazão total a ser consumida. Tendo-se o traçado da rede e a distribuição da população nas diversas regiões pela rede abrangida, determina-se os coeficientes de distribuição linear para cada trecho da rede. Faz-se o seccionamento da rede, sempre tendo em vista que a diferença de pressões nos pontos seccionados deve tender a zero. Deve-se ressaltar que, para efeito deste exemplo, escolheu-se, por simplicidade, o cálculo com a vazão em marcha, apesar de todas as críticas que os engenheiros têm feito a este método, que se encontra ultrapassado à luz de conceitos que visam caracterizar mais precisamente as vazões instantâneas, como, por exemplo, a consideração dos conceitos probabilísticos. Apesar deste fato, é um método simples, sendo ainda o mais utilizado pelos projetistas.

A programação do exemplo de aplicação do método, indicada no anexo II deste trabalho, imprime, na seguinte ordem, a vazão a jusante, a vazão em marcha, a vazão a montante, a vazão fictícia, a perda de carga unitária e a perda de carga em toda a extensão do trecho de tubula-

ção que se está estudando. De posse destes valores, e tendo-se na planta de locação da rede a cota dos pontos a montante e a jusante de cada trecho, fica imediato o cálculo das pressões disponíveis e das cotas piezométricas. Poder-se-ia fazer uma programação que calculasse diretamente, através de um computador, também as pressões e cotas piezométricas. Mas, deve-se lembrar que todos os dados de cotas de todos os pontos, devem ser armazenados e, para uma rede não muito grande, o tempo que se perde fazendo a entrada destes dados é muito grande, além do preço de processamento incorrer em gastos adicionais. Desta forma, é muito mais econômico e rápido proceder-se a um cálculo do estilo do que foi apresentado.

Para grandes redes, em que se queira fazer com o auxílio do computador, ou a utilização do método de Cross ou qualquer outro processo, a perda de carga pode ser calculada adaptando-se a programação apresentada, ou baseando-se no algoritmo proposto no diagrama de blocos do Anexo I.

Nesta programação, deve-se carregar algumas memórias da máquina, a saber:

a) Na memória 1, deve estar armazenado o valor da vazão a jusante do trecho que se está estudando, que corresponde à soma das vazões dos trechos a jusante deste trecho. Suponha-se a rede esquematizada no desenho do Anexo III. No estudo do trecho FE, na memória 1 deverá estar o valor zero, pois é o início de uma seqüência de trechos. Já nos trechos ED e DC, como eles fazem parte da mesma seqüência anterior e não há colaboração de outras seqüências de trechos de rede, não é necessário recarregar a memória 1, pois numa mesma seqüência, a calculadora carrega esta memória automaticamente. Seguindo-se o cálculo da rede, nota-se que o ponto C colabora para uma nova seqüência de trechos (HG e GC). Logo, esta seqüência deve ser calculada antes de CB, valendo para ela as mesmas considerações anteriores, zerando-se a memória 1 quando do cálculo de HG. O trecho CB colabora para as duas seqüências de trecho anteriormente citadas. Logo, a soma das vazões a montante dos trechos CD e CG será a vazão a jusante de CB, valor este a ser colocado na memória 1. Idênticos comentários para as vazões a montante de CB e da seqüência BIJ, cuja soma será a vazão a jusante do trecho AB e, assim por diante, calcula-se toda a rede. As vazões en-

* (A programação completa está indicada no anexo II).

tram na memória em litros por segundo.

b) Na memória 3, deverá estar o valor do coeficiente de distribuição linear para o trecho em estudo.

c) Na memória 5, deverá estar o valor do diâmetro estipulado para o trecho em estudo (em metros).

d) Na memória 6, deverá estar o valor de x_0 , apresentado no item Descrição do Método.

Com estes valores nas memórias, carrega-se a calculadora com o valor do comprimento do trecho em estudo e aperta-se a tecla A, saindo, dessa forma, imprimidas todas as respostas do método do seccionamento, já mencionadas anteriormente. No caso de se desejar apenas calcular a perda de carga em um determinado trecho de uma canalização, deve-se carregar a memória 6 com o valor de x_0 , a memória 0 com o valor do comprimento da tubulação daquele trecho de rede, escrever na máquina o valor do diâmetro do trecho em metros, apertar a tecla ENTER, escrever na máquina o valor da vazão que percorrerá o trecho da tubulação em m^3/s e apertar a tecla B. Desta forma, será impressa apenas a perda de carga unitária e a perda de carga total no trecho, para os valores carregados na máquina.

Apenas como comentários finais, deve-se salientar que foi inserido dentro da programação o valor K, que neste cálculo de redes é adotado como 0,1 mm e que já leva em conta as perdas de carga singulares, bem como o valor da viscosidade da água (que normalmente escoa a 20°C de temperatura) igual a $10^{-6} m^2/s$ nessa temperatura.

VI. CONCLUSÃO

Acredita-se que desta forma foi apresentado um processo de cálculo rápido e preciso para a perda de carga, que evitará que o engenheiro projetista tenha de recorrer às tabelas habituais e fazer iterações de valores, o que representa grande economia de tempo.

VII. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

1. ABNT. *Elaboração de Projetos de Sistemas de Adução de Água para Abastecimento Público*; Projeto NB-591, 1º projeto de norma, junho de 1977.
2. BONNET, L. *Traité Pratique des Distributions D'Eau et Des Egouts Hydraulique*, Paris, Librairie Polytechnique, 1942.
3. FACULDADE DE SAÚDE PÚBLICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO & CENTRO TECNOLÓGICO DE SA-

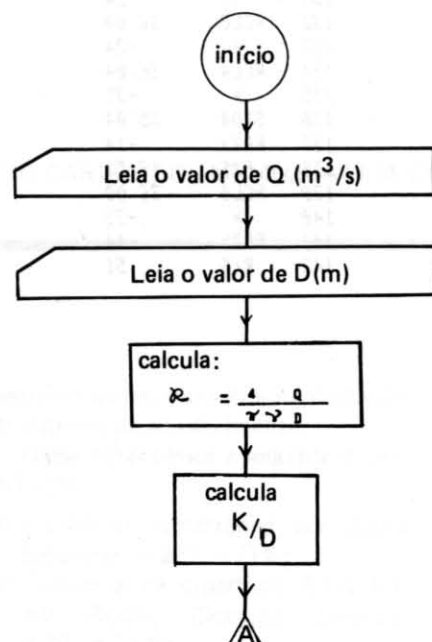
NEAMENTO BÁSICO – CETESB.
Técnica de Abastecimento e Tratamento de Água, São Paulo, 1973.

4. PIMENTA, C.F. *Curso de Hidráulica Geral*. São Paulo, Centro Tecnológico de Hidráulica, vol. 1, 1977.
5. STREETER, V.L. *Fluid Mechanics*. New York, Mc Graw Hill Book Company, Inc., 1951.

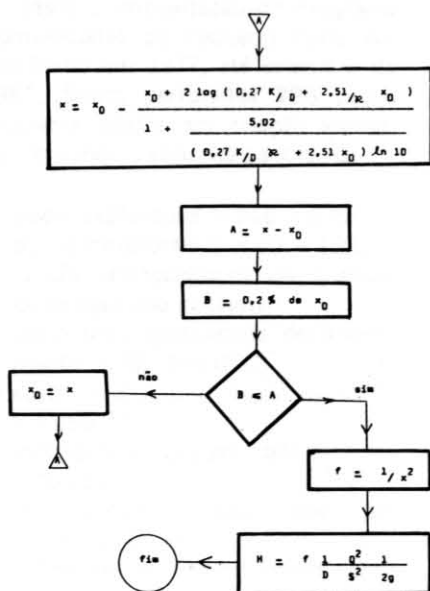
ANEXO I

DIAGRAMA DE BLOCOS PARA O CÁLCULO DA PERDA DE CARGA UNITÁRIA.

a) Entrada de valores de Q e D e cálculo do número de Reynolds e da rugosidade relativa.



b) Processo iterativo – o valor de x_0 já deve estar em alguma memória na máquina.



ANEXO II

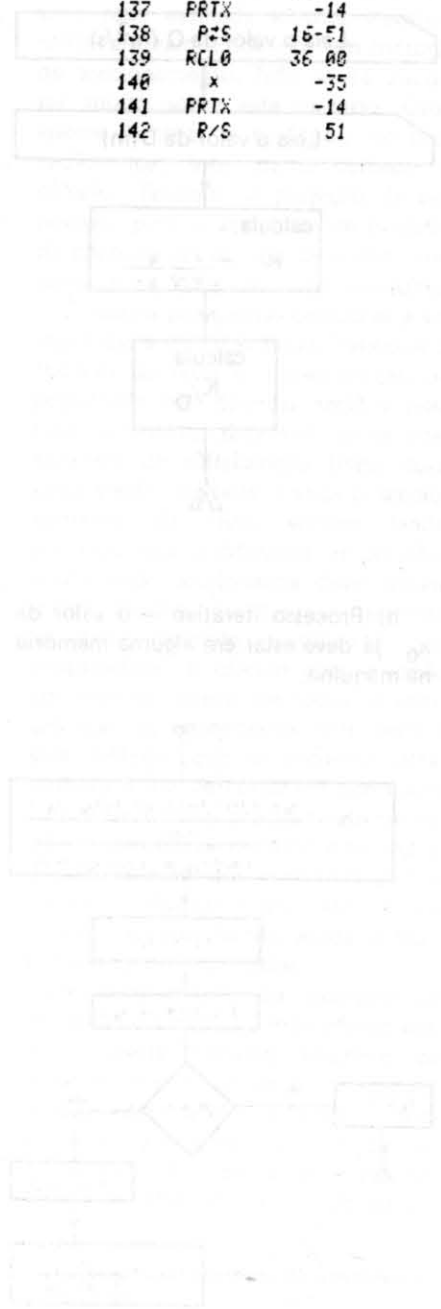
CÁLCULO DE REDES DE ÁGUA COM A UTILIZAÇÃO PRÁTICA DA FÓRMULA UNIVERSAL DE PERDA DE CARGA.

Exemplo de aplicação para um método de seccionamento.

001	LBLA	21 11
002	STOP	35 00
003	RCL1	36 01
004	ST02	35 02
005	FRTX	-14
006	RCL0	36 00
007	RCL3	36 03
008	X	-35
009	FRTX	-14
010	RCL2	36 02
011	+	-55
012	ST01	35 01
013	PRTX	-14
014	RCL2	36 02
015	+	-55
016	2	02
017	÷	-24
018	ST04	35 04
019	PRTX	-14
020	FEEX	-23
021	3	03
022	CHS	-22
023	X	-35
024	RCL5	36 05
025	XZY	-41
026	*LBL5	21 12
027	P2S	16-51
028	ST01	35 01
029	R4	-31
030	ST00	35 00
031	P2S	16-51
032	RCL6	36 06
033	P2S	16-51
034	ST04	35 04
035	4	04
036	ENT1	-21
037	Pi	16-24
038	÷	-24
039	RCL1	36 01
040	X	-35
041	RCL0	36 00
042	÷	-24
043	EEA	-23
044	E	06
045	CHS	-22
046	÷	-24
047	ST03	35 03
048	EEX	-23
049	4	04
050	CHS	-22
051	RCL0	36 00
052	÷	-24
053	ST02	35 02
054	*LBL1	21 01
055	.	-62
056	2	02
057	7	07
058	X	-35
059	RCL4	36 04
060	2	02
061	.	-62
062	5	05
063	1	01
064	X	-35
065	RCL3	36 03
066	÷	-24
067	+	-55
068	ST06	35 08
069	LOG	16 32
070	2	02
071	X	-35
072	RCL4	36 04
073	+	-55
074	ST05	35 05

075	RCL6	36 08
076	RCL3	36 03
077	x	-35
078	1	01
079	0	00
080	LN	32
081	x	-35
082	5	05
083	.	-62
084	0	00
085	2	02
086	XZY	-41
087	÷	-24
088	1	01
089	+	-55
090	RCL5	36 05
091	XZY	-41
092	÷	-24
093	RCL4	36 04
094	XZY	-41
095	-	-45
096	ST05	35 05
097	RCL4	36 04
098	-	-45
099	ST08	35 08
100	RCL4	36 04
101	.	-62
102	2	02
103	%	55
104	RCL8	36 08
105	XZY	-41
106	XZY?	16-35
107	GT02	22 02
108	RCL5	36 05

105	ST04	35 04
110	GT01	22 01
111	XLBL2	21 02
112	RCL5	36 05
113	X²	53
114	1/X	52
115	ST04	35 04
116	4	04
117	EN17	-21
118	Pi	16-24
119	÷	-24
120	RCL1	36 01
121	x	-35
122	RCL0	36 00
123	X²	53
124	÷	-24
125	X²	53
126	2	02
127	÷	-24
128	9	09
129	.	-62
130	8	08
131	÷	-24
132	RCL0	36 00
133	÷	-24
134	RCL4	36 04
135	x	-35
136	ST04	35 04
137	PRTX	-14
138	PzS	16-51
139	RCL0	36 00
140	x	-35
141	PRTX	-14
142	R/S	51



ANEXO III
Desenho de rede para exemplificar a utilização da memória 1.

