



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ELETRICIDADE



CONTRIBUIÇÕES PARA O FLUXO DE CARGA EM MICRORREDES EM OPERAÇÃO ISOLADA



Iasmim Andrade Almeida

Prof. Dr. Osvaldo R. Saavedra

Prof. Dr. Denisson Q. Oliveira

Sumário

1. Introdução
2. Fluxo de Carga
3. Fluxo de Carga em Microrredes Isoladas – Particularidades
4. Resolução via Método de Newton-Raphson
5. Resolução via Método de Newton-Raphson Modificado
6. Estudos de caso
7. Discussões, resultados parciais e conclusões

Fluxo de Carga

- Visa conhecer o estado estático de uma Rede Elétrica
 - Tensões, Ângulos, Potencias nos Barramentos
 - Fluxos nos Ramos e Perdas de Potencia
- Modelagem do Problema:
 - Sistema de Equações e Inequações Algébricas
 - Resolução através de Métodos Iterativos
 - Barras classificadas em $V\theta$, PV, PQ
 - Método de Newton-Raphson

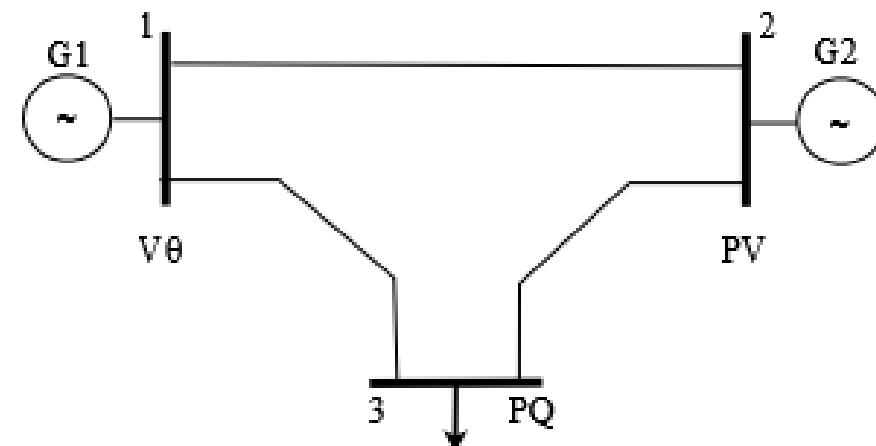


Fig.1 – Sistema de 3 Barras

Fluxo de Carga

Tabela I – Tipos de Barramentos em uma Rede

Tipo de Barra	Variáveis Conhecidas	Variáveis Desconhecidas
PQ	P e Q	V e θ
PV	P e V	Q e θ
V θ	V e θ	P e Q

$$P_k = |V_k| \sum_{n=1}^N Y_{kn} |V_n| \cos(\theta_k - \theta_n - \varphi_{kn})$$

$$Q_k = |V_k| \sum_{n=1}^N Y_{kn} |V_n| \sin(\theta_k - \theta_n - \varphi_{kn})$$

$$\Delta P = P_k^{esp} - P_k = 0$$

$$\Delta Q = Q_k^{esp} - Q_k = 0$$

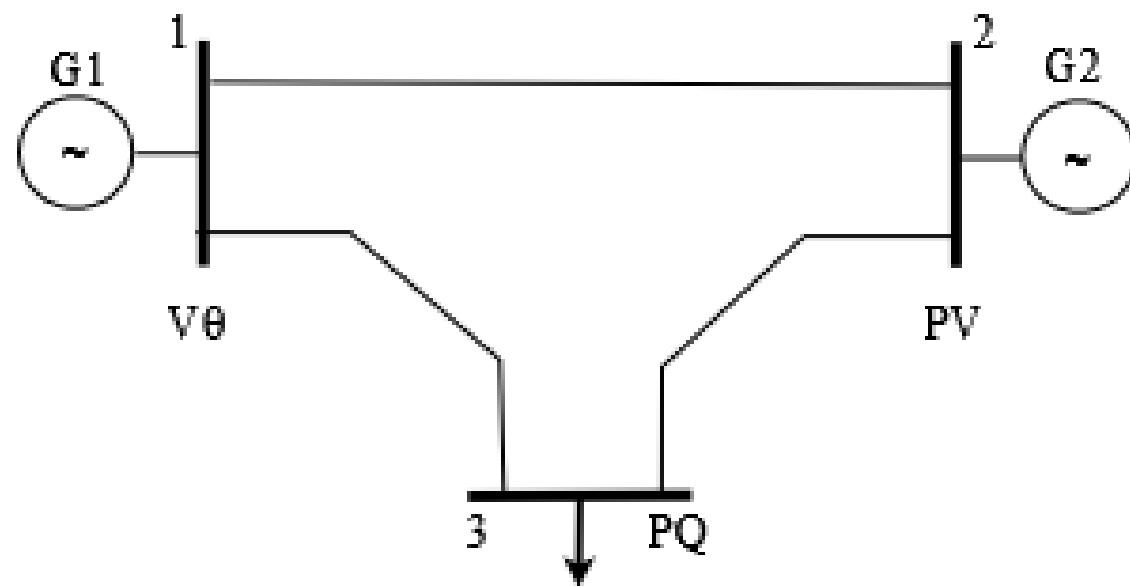


Fig.1 – Sistema de 3 Barras

Fluxo de Carga em Microrredes Isoladas - Particularidades

- Problema:
 - Ausência de Barramento de Referencia
 - Presença de Gerações com Controle Droop
 - Variações na Frequência da Rede
 - Limitação da classificação $V\theta$, PV, PQ

Tabela II – Tipos de Barramentos numa Microrrede Isolada

Tipo de Barra	Variáveis Conhecidas	Variáveis Desconhecidas
PQ	P e Q	V e θ
PV	P e V	Q e θ
VF	-	V, θ , P e Q
$V\theta$	Não se aplica	

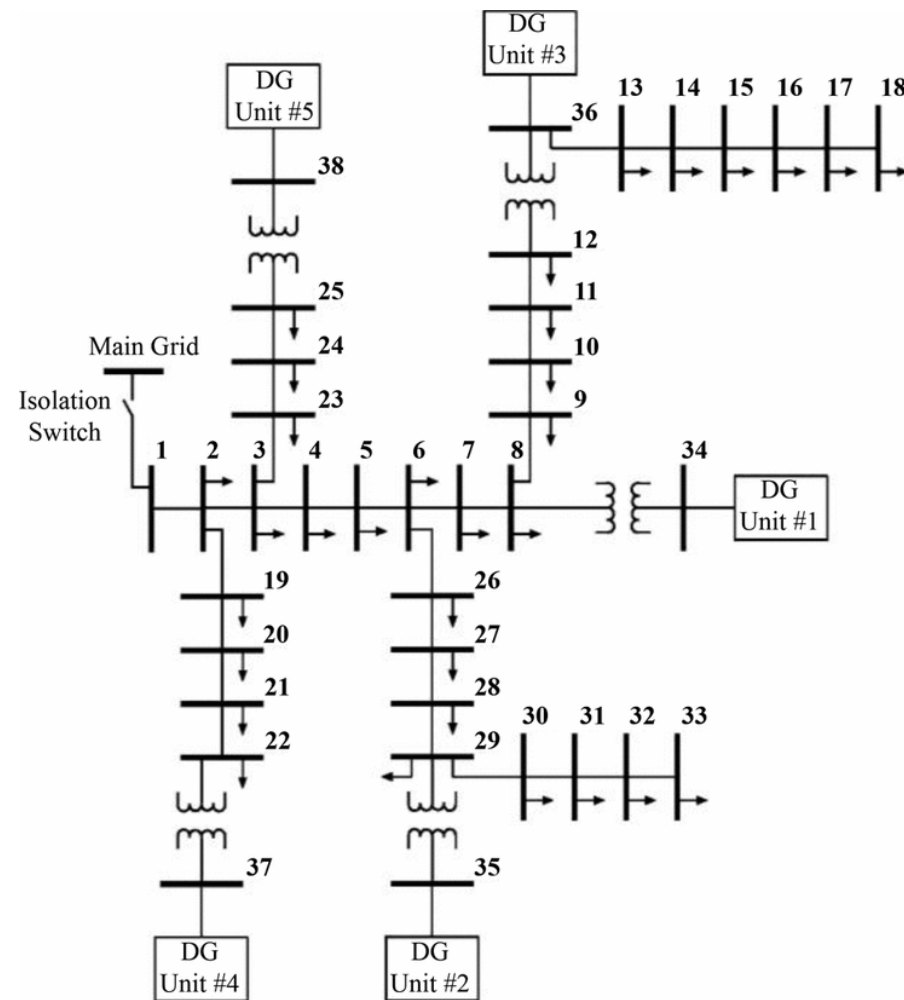
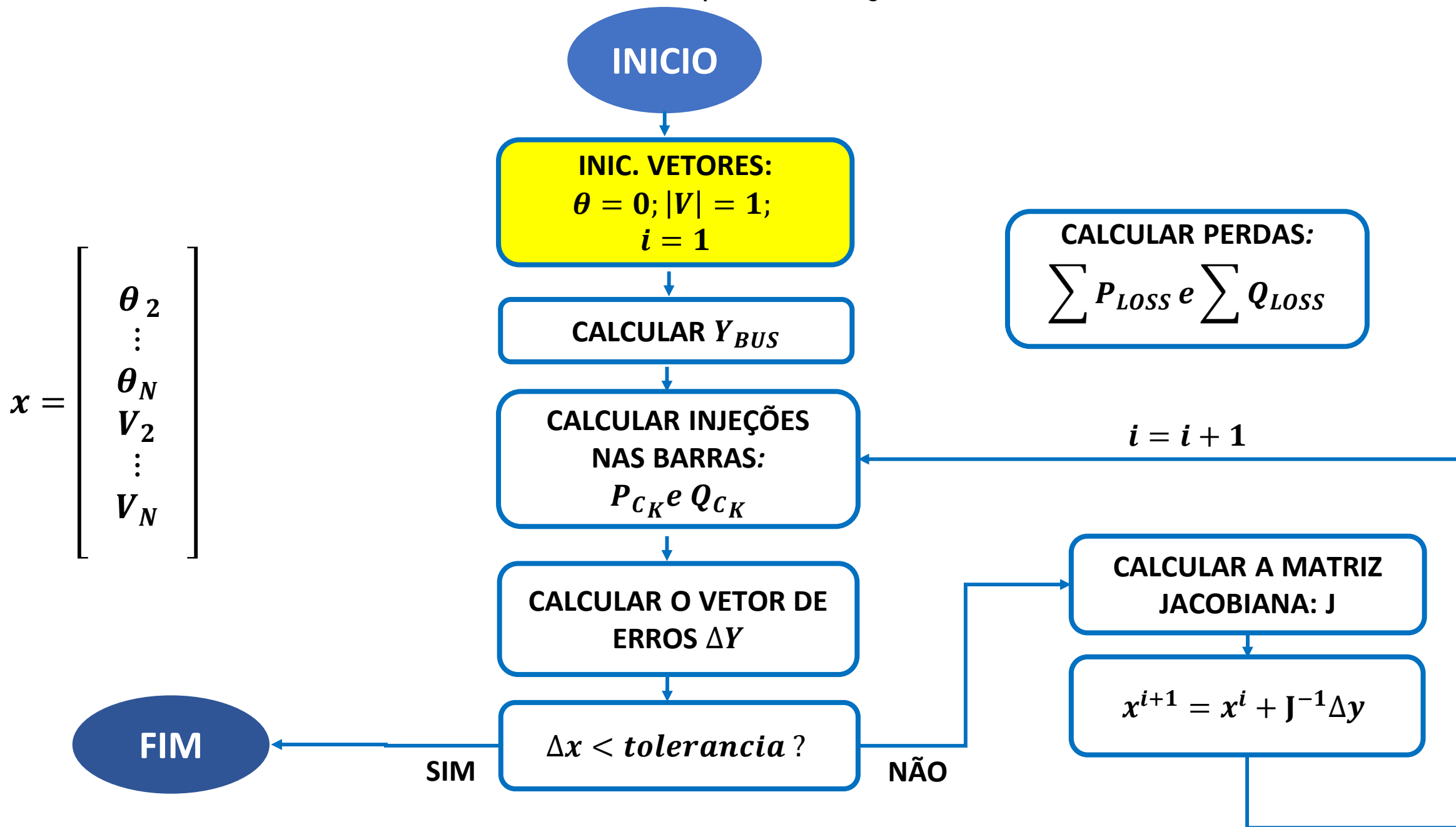


Fig. 2– Microrrede de 38 Barras (Fonte: Ref. [1])

Método de Newton-Raphson - Fluxograma



Método de Newton-Raphson - Fluxograma

INICIO

INIC. VETORES:
 $\theta = 0; |V| = 1;$
 $i = 1$

CALCULAR Y_{BUS}

CALCULAR INJEÇÕES NAS BARRAS:
 P_{CK} e Q_{CK}

CALCULAR O VETOR DE ERROS ΔY

$\Delta x < \textit{tolerancia}$?

CALCULAR PERDAS:
 $\sum P_{LOSS}$ e $\sum Q_{LOSS}$

CALCULAR A MATRIZ JACOBIANA: J

$x^{i+1} = x^i + J^{-1} \Delta y$

FIM

SIM

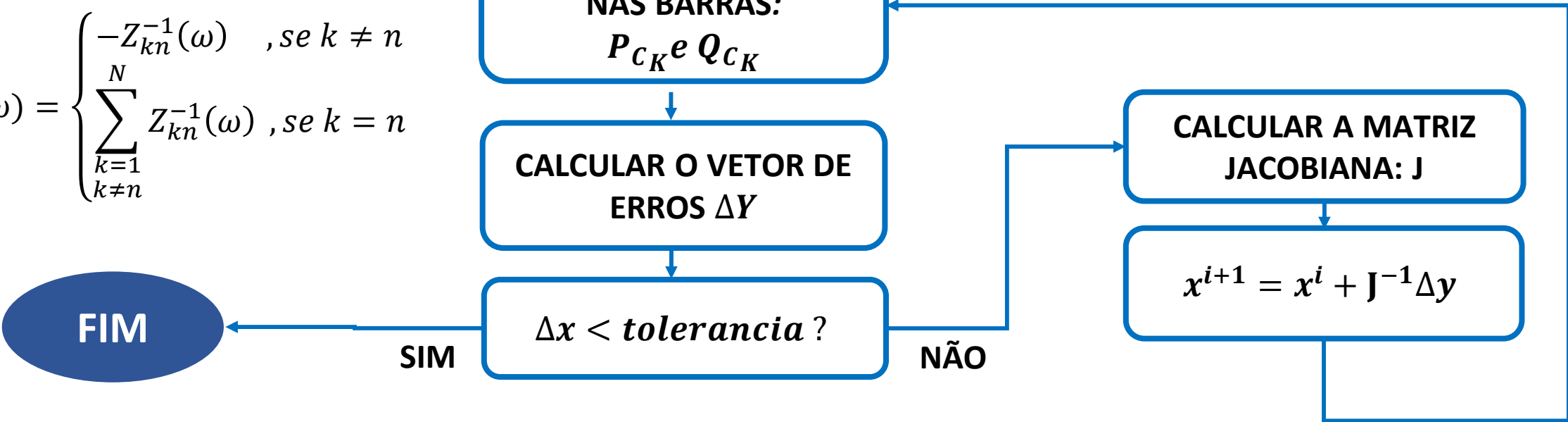
NÃO

$i = i + 1$

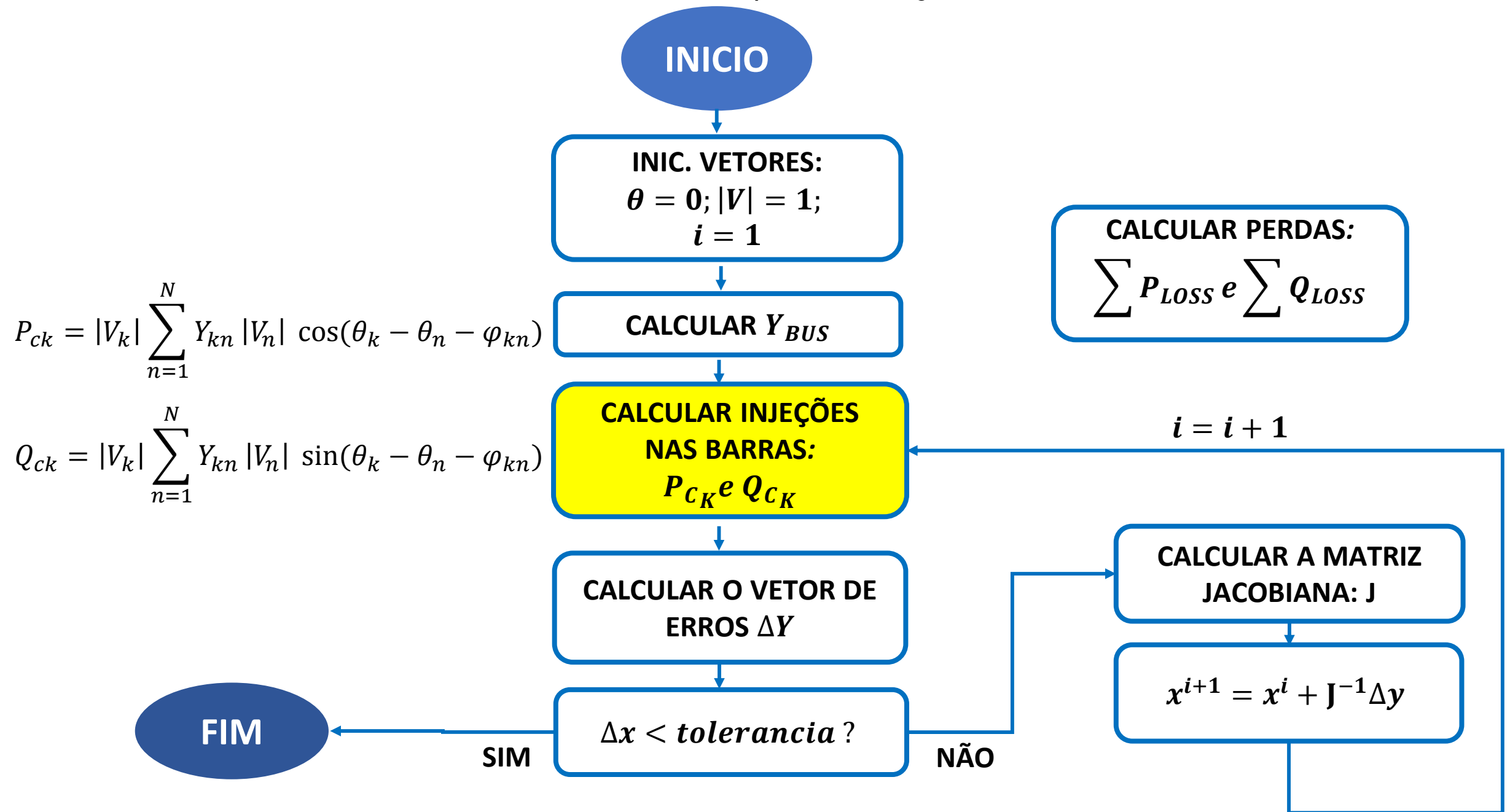
$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11}(\omega) & \cdots & Y_{1N}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1}(\omega) & \cdots & Y_{NN}(\omega) \end{bmatrix}$$

Em que:

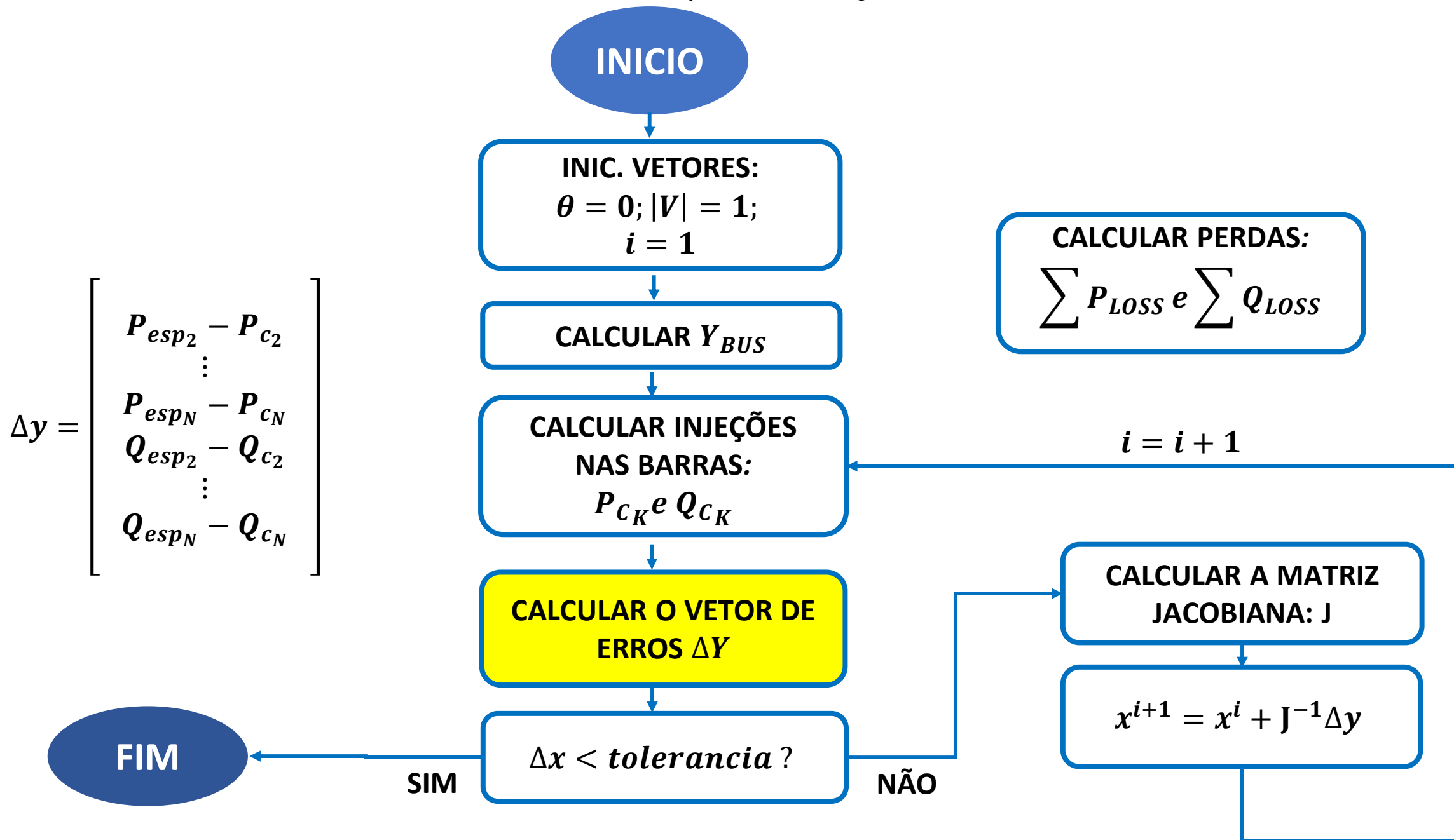
$$Y_{kn}(\omega) = \begin{cases} -Z_{kn}^{-1}(\omega) & , \text{ se } k \neq n \\ \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq n}}^N Z_{kn}^{-1}(\omega) & , \text{ se } k = n \end{cases}$$



Método de Newton-Raphson - Fluxograma



Método de Newton-Raphson - Fluxograma



Método de Newton-Raphson - Fluxograma

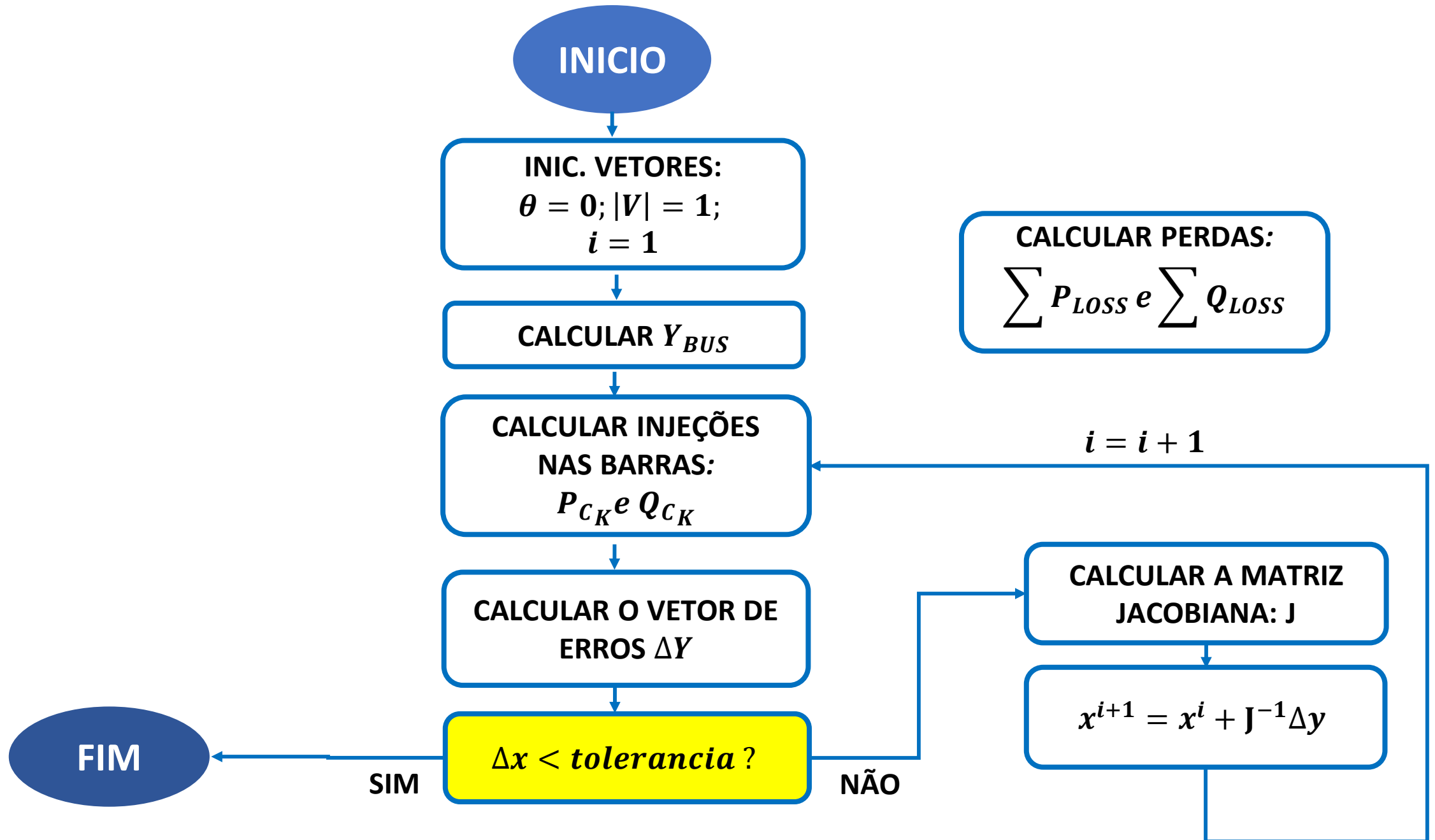
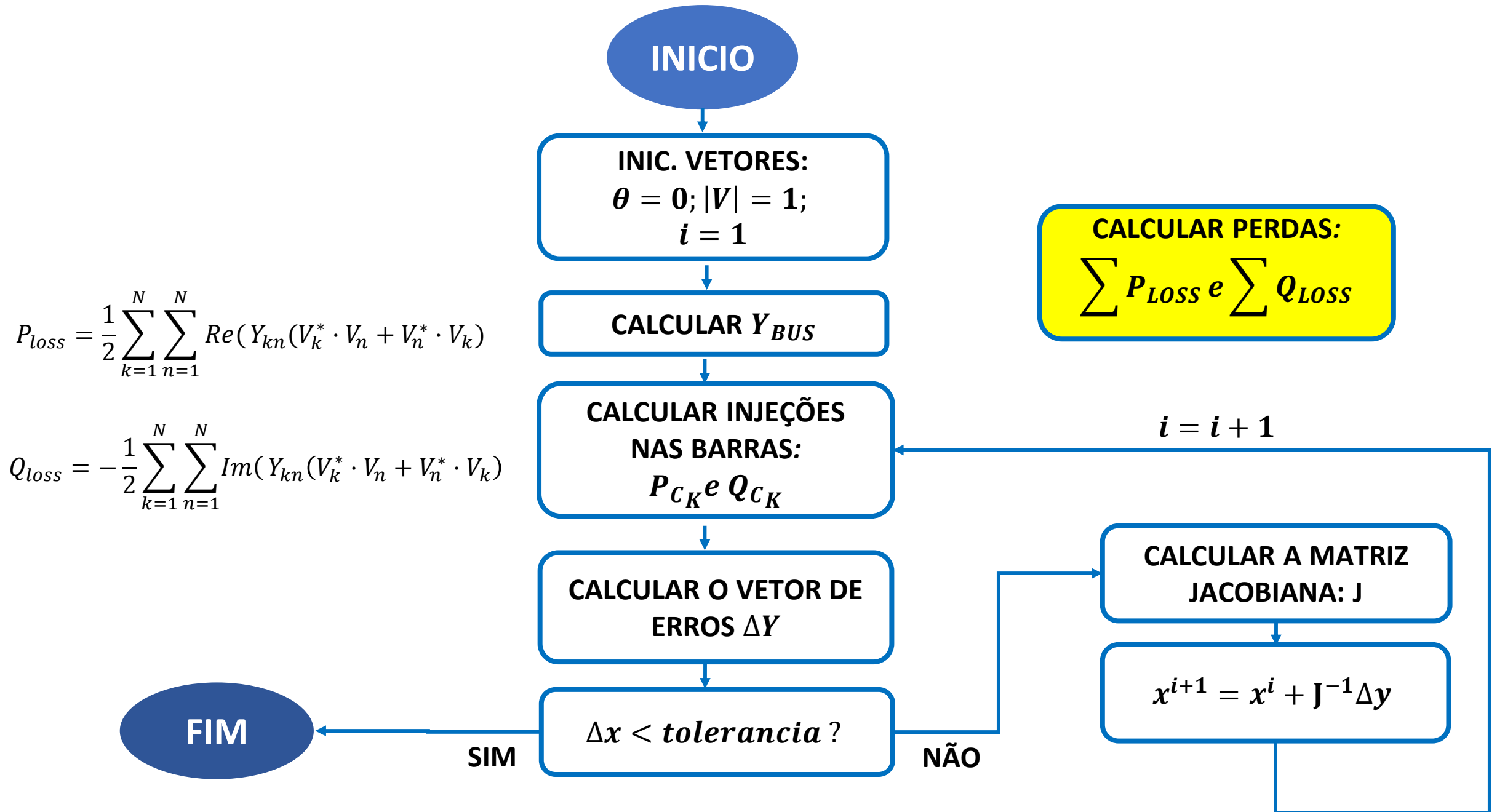
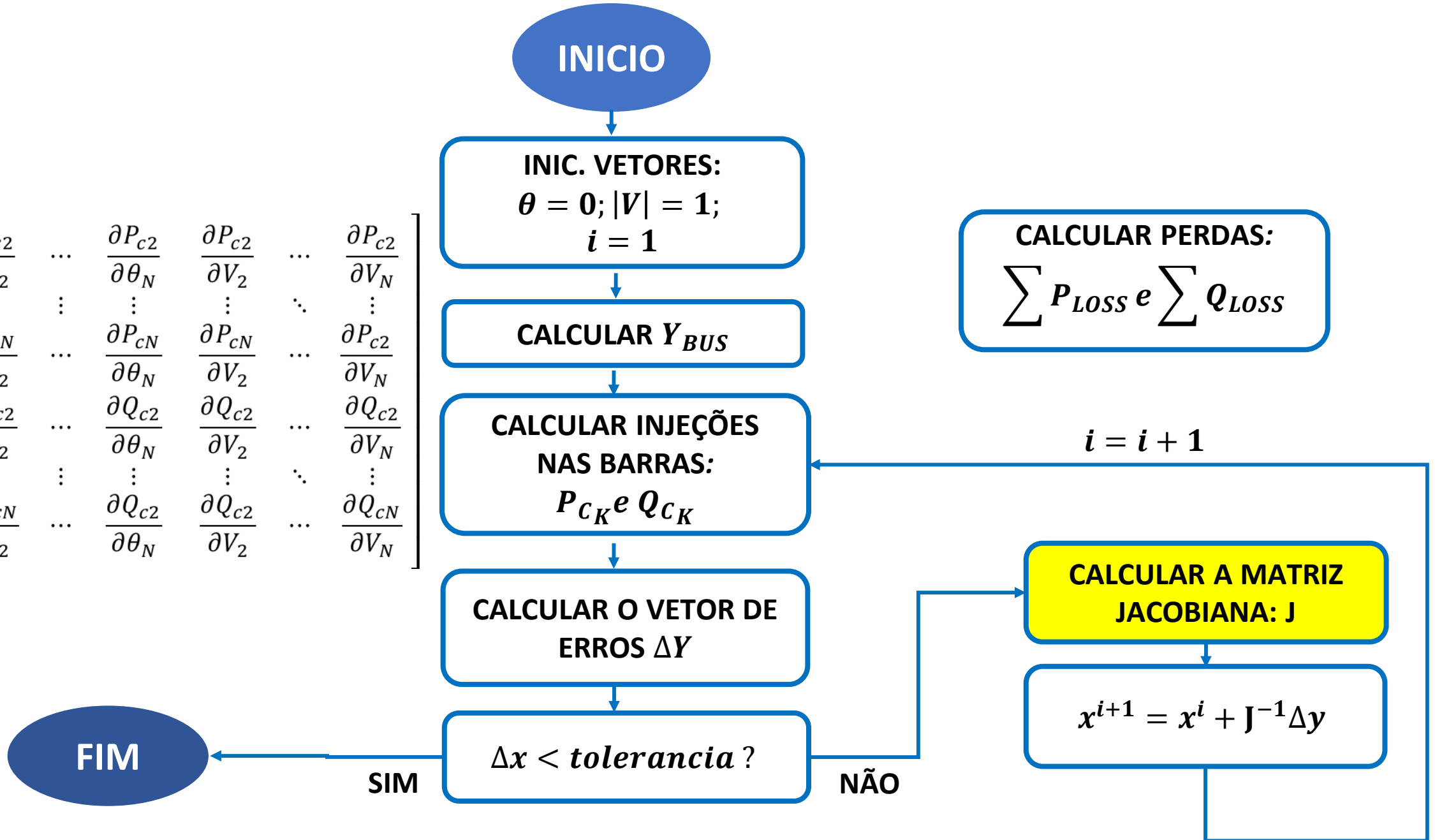


Fig. 1. Fluxograma de solução do problema

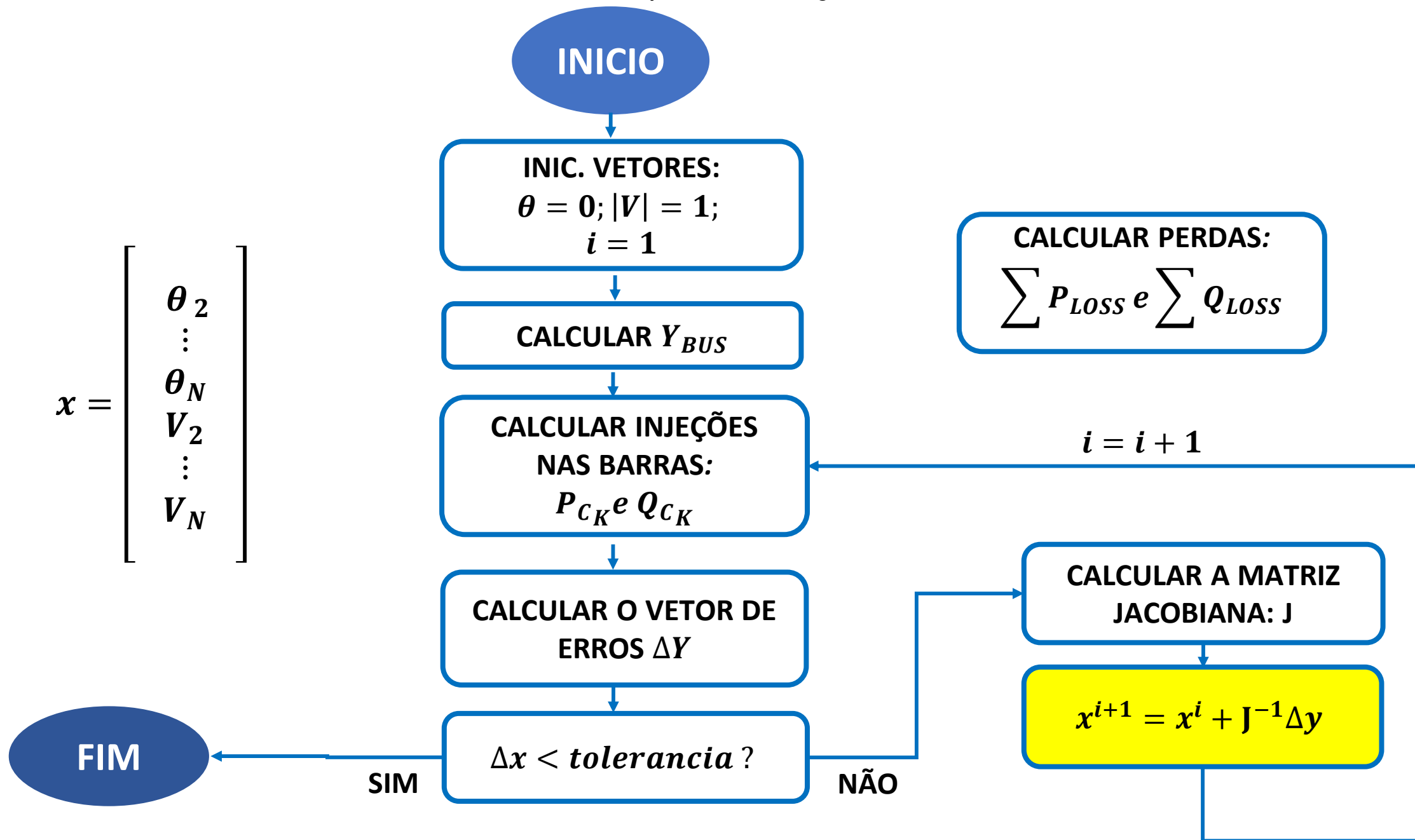


Método de Newton-Raphson - Fluxograma

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{c2}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_{c2}}{\partial \theta_N} & \frac{\partial P_{c2}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_{c2}}{\partial V_N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{cN}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_{cN}}{\partial \theta_N} & \frac{\partial P_{cN}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_{c2}}{\partial V_N} \\ \frac{\partial Q_{c2}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_{c2}}{\partial \theta_N} & \frac{\partial Q_{c2}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_{c2}}{\partial V_N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{cN}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_{c2}}{\partial \theta_N} & \frac{\partial Q_{c2}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_{cN}}{\partial V_N} \end{bmatrix}$$



Método de Newton-Raphson - Fluxograma



Resolução via Método de Newton-Raphson Modificado

- Classificação dos barramentos VF, PV, PQ
- Inclui presença de Controle Droop
- Inclui as Variações na Frequência da Rede

Tabela II – Tipos de Barramentos numa Microrrede Isolada (Fonte: Ref. [2])

Tipo de Barra	Variáveis Conhecidas	Variáveis Desconhecidas
PQ	P e Q	V e θ
PV	P e V	Q e θ
VF	-	V, θ , P e Q

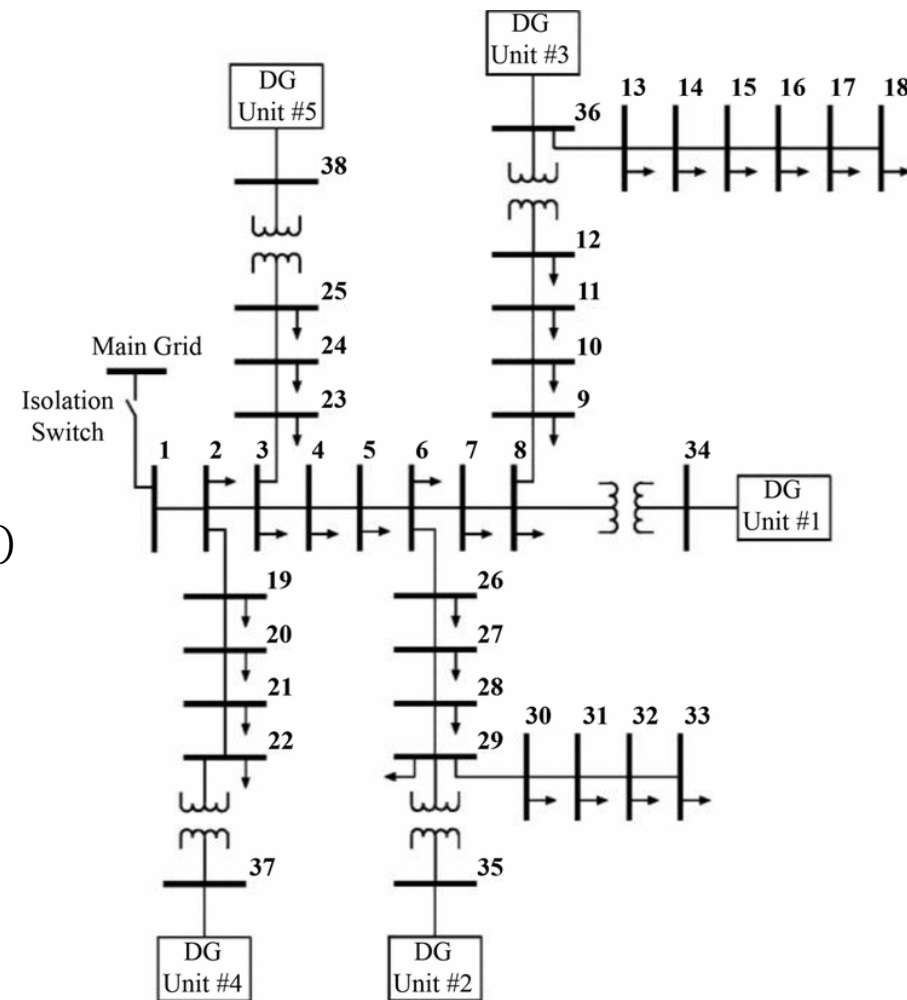


Fig. 2– Microrrede de 38 Barras (Fonte: Ref. [1])

Fig. 1. Fluxograma de solução do problema (Fonte: Ref. [2])

$$i = i + 1$$

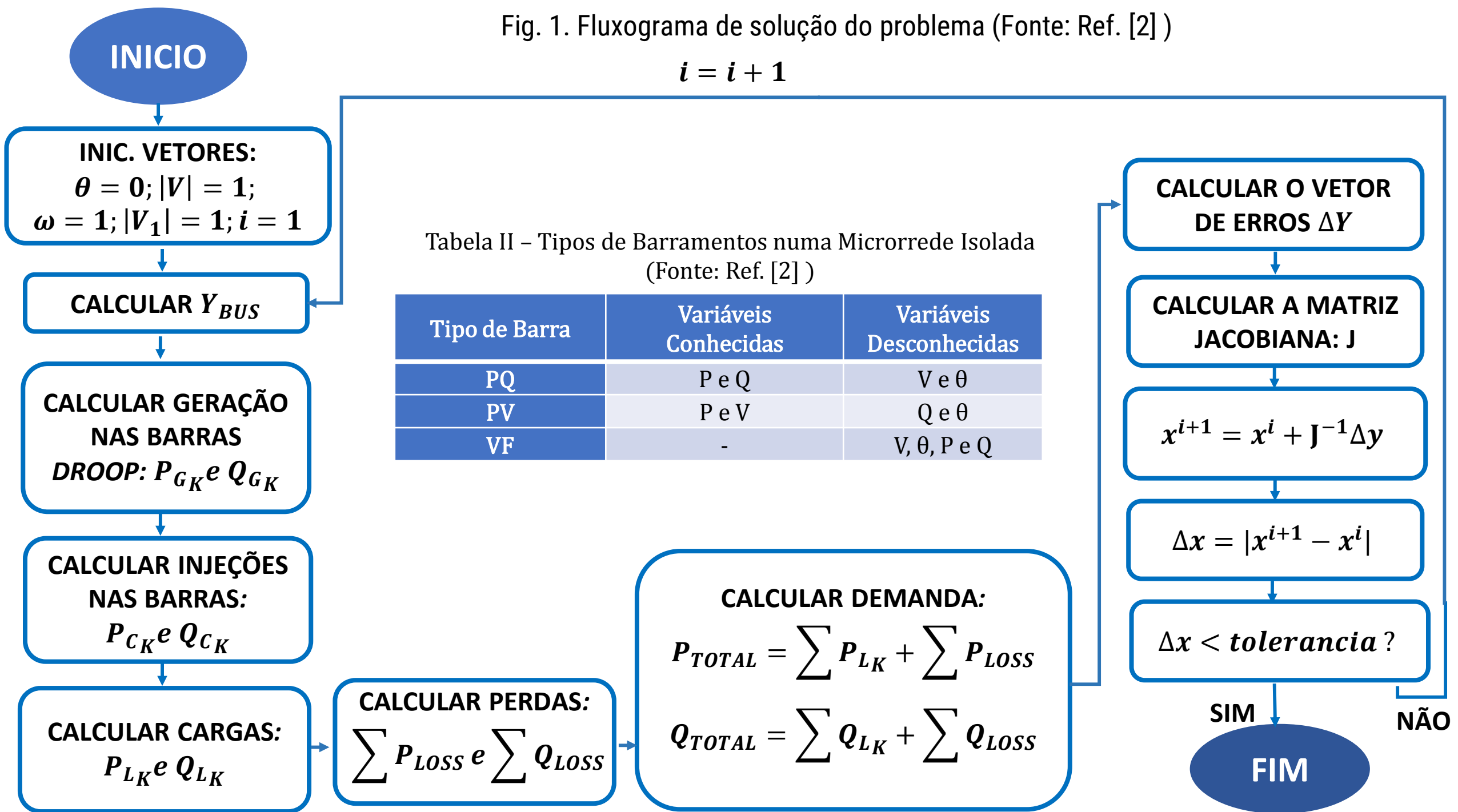


Fig. 1. Fluxograma de solução do problema (Fonte: Ref. [2])

$$i = i + 1$$

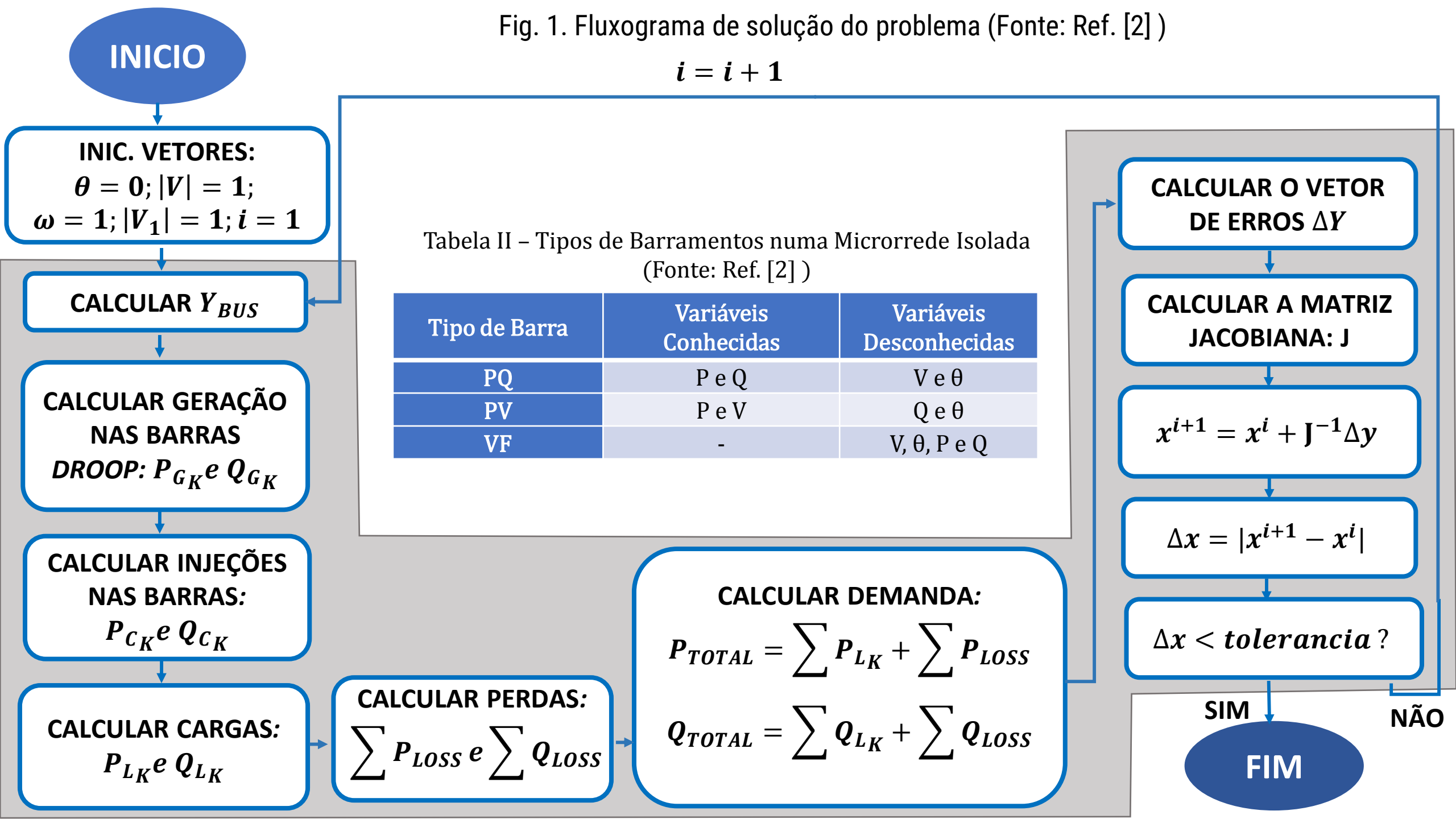


Tabela II - Tipos de Barramentos numa Microrrede Isolada (Fonte: Ref. [2])

Tipo de Barra	Variáveis Conhecidas	Variáveis Desconhecidas
PQ	P e Q	V e θ
PV	P e V	Q e θ
VF	-	V, θ , P e Q

CALCULAR DEMANDA:

$$P_{TOTAL} = \sum P_{LK} + \sum P_{LOSS}$$

$$Q_{TOTAL} = \sum Q_{LK} + \sum Q_{LOSS}$$

CALCULAR PERDAS:

$$\sum P_{LOSS} \text{ e } \sum Q_{LOSS}$$

CALCULAR O VETOR DE ERROS ΔY

CALCULAR A MATRIZ JACOBIANA: J

$$x^{i+1} = x^i + J^{-1}\Delta y$$

$$\Delta x = |x^{i+1} - x^i|$$

$\Delta x < \textit{tolerancia}$?

SIM

FIM

NÃO

Fig. 1. Fluxograma de solução do problema (Fonte: Ref. [2])

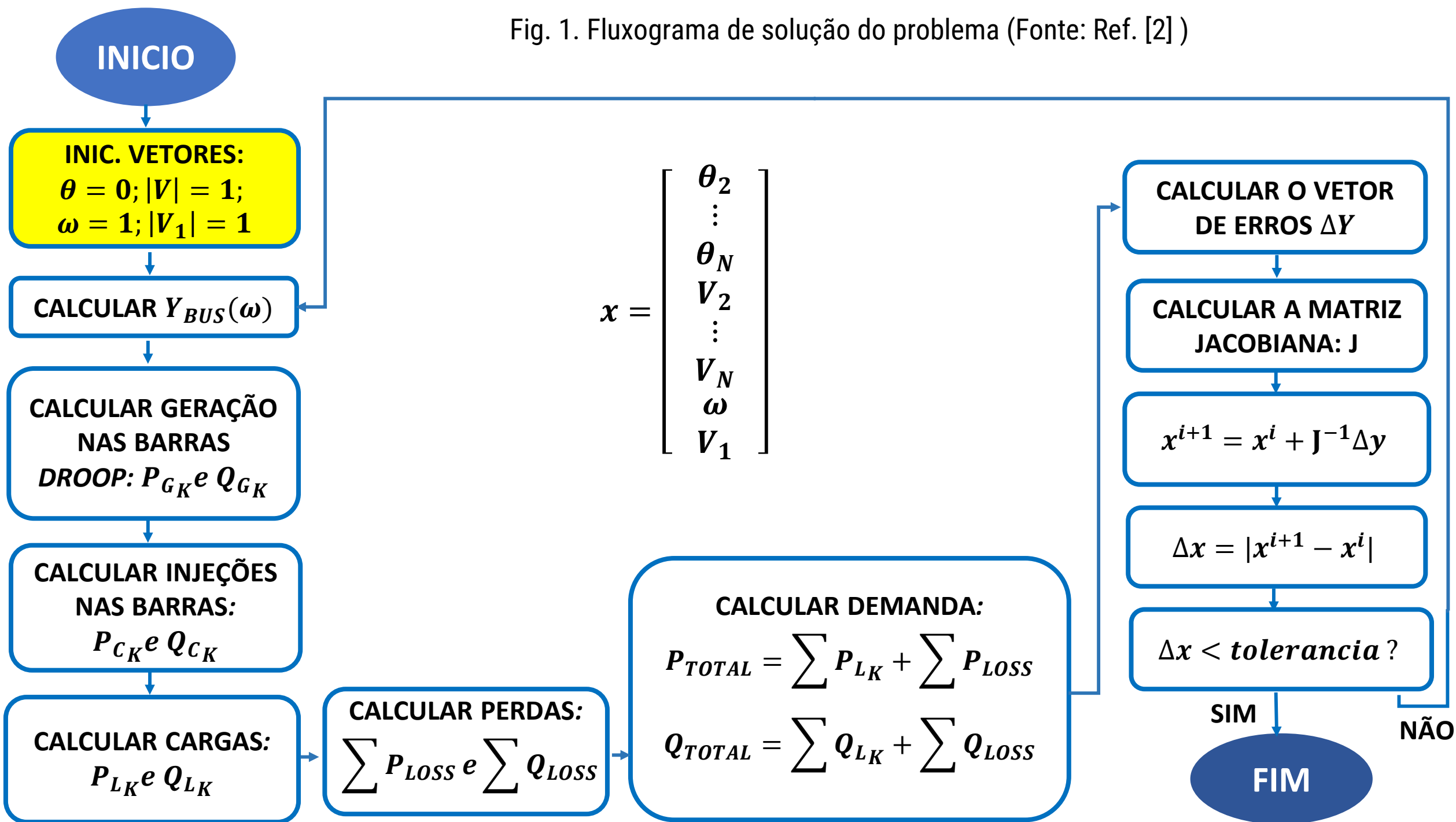


Fig. 1. Fluxograma de solução do problema (Fonte: Ref. [2])

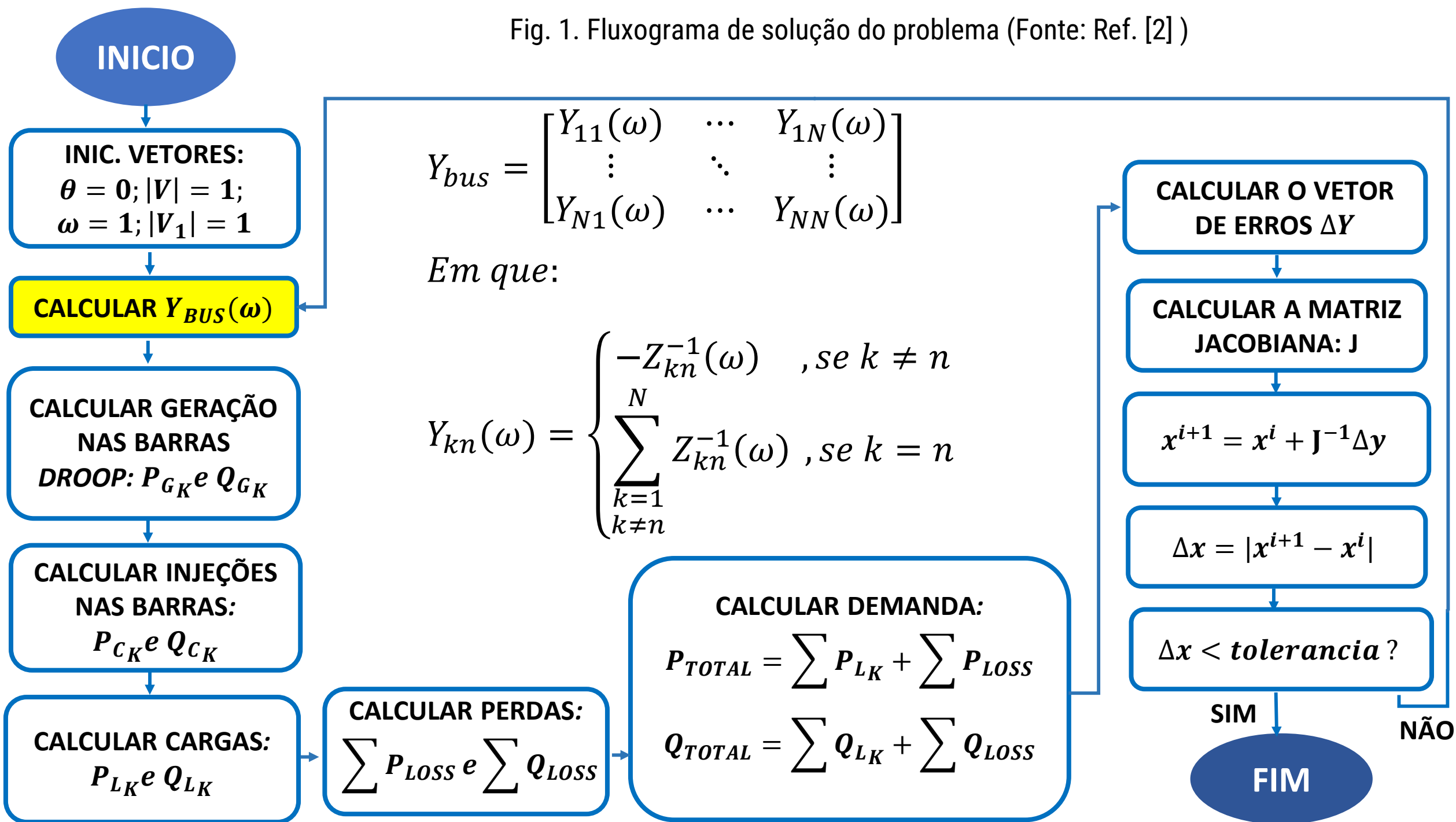


Fig. 1. Fluxograma de solução do problema (Fonte: Ref. [2])

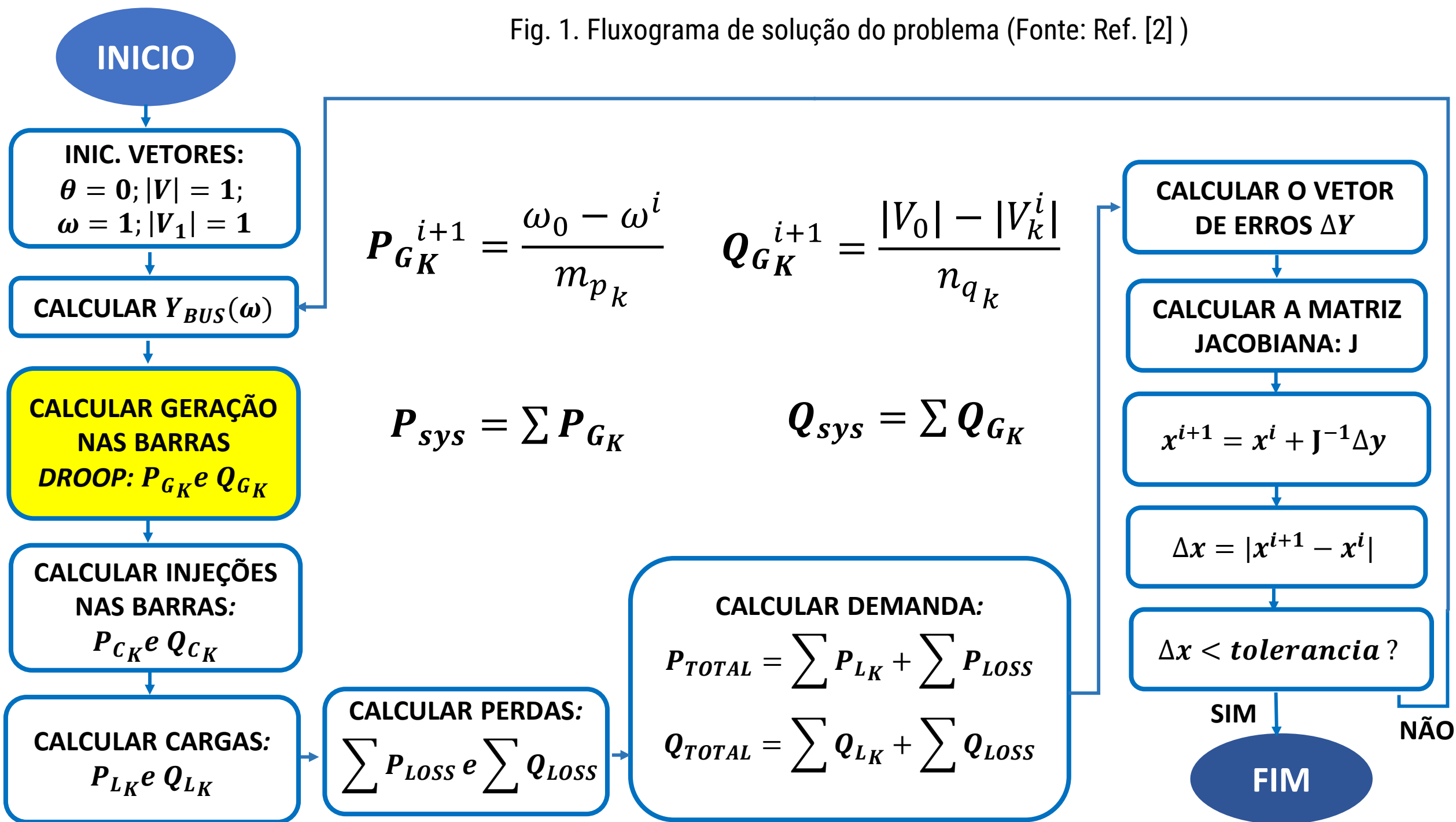


Fig. 1. Fluxograma de solução do problema (Fonte: Ref. [2])

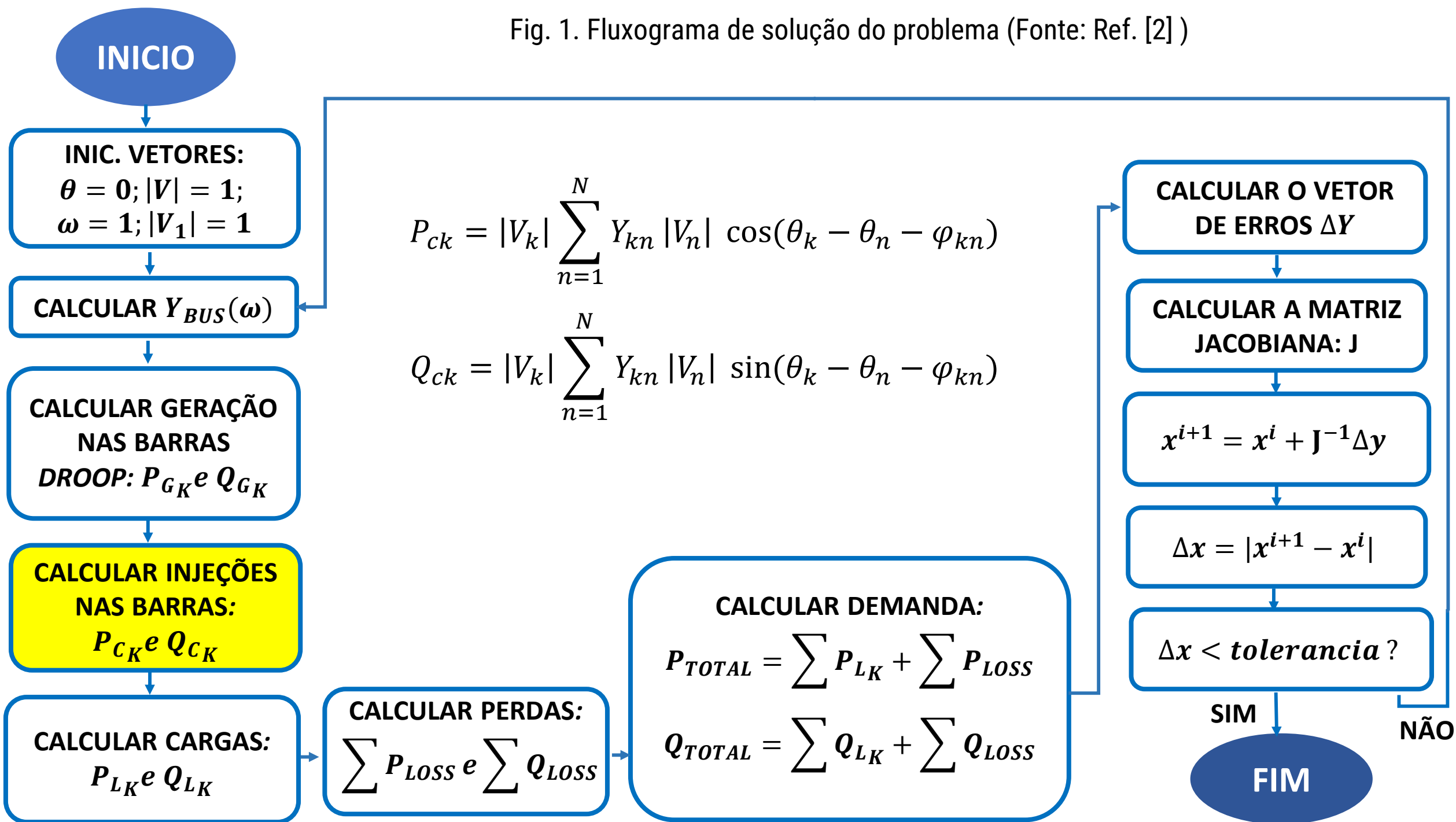


Fig. 1. Fluxograma de solução do problema (Fonte: Ref. [2])

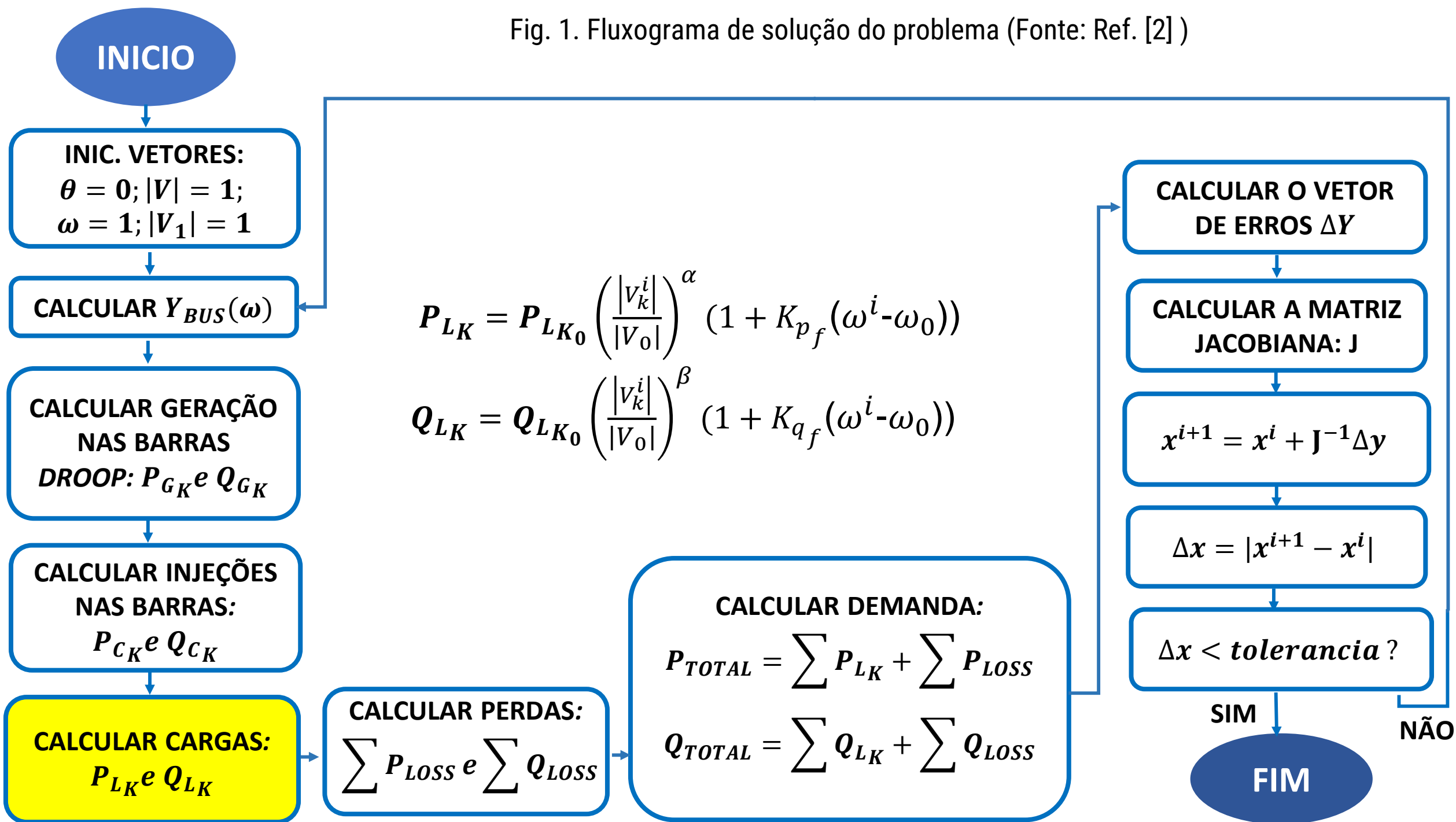


Fig. 1. Fluxograma de solução do problema (Fonte: Ref. [2])

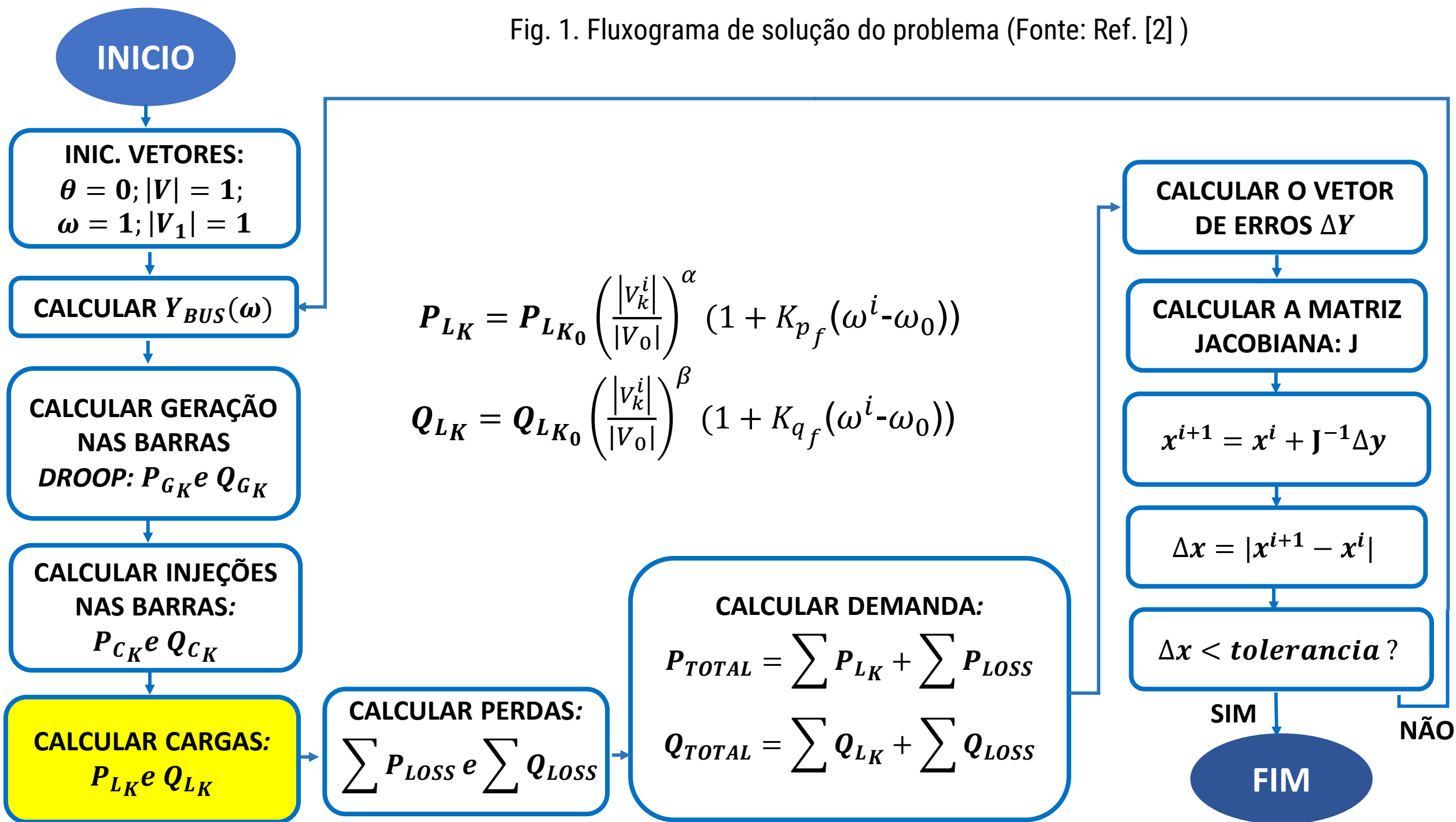


Fig. 1. Fluxograma de solução do problema (Fonte: Ref. [2])

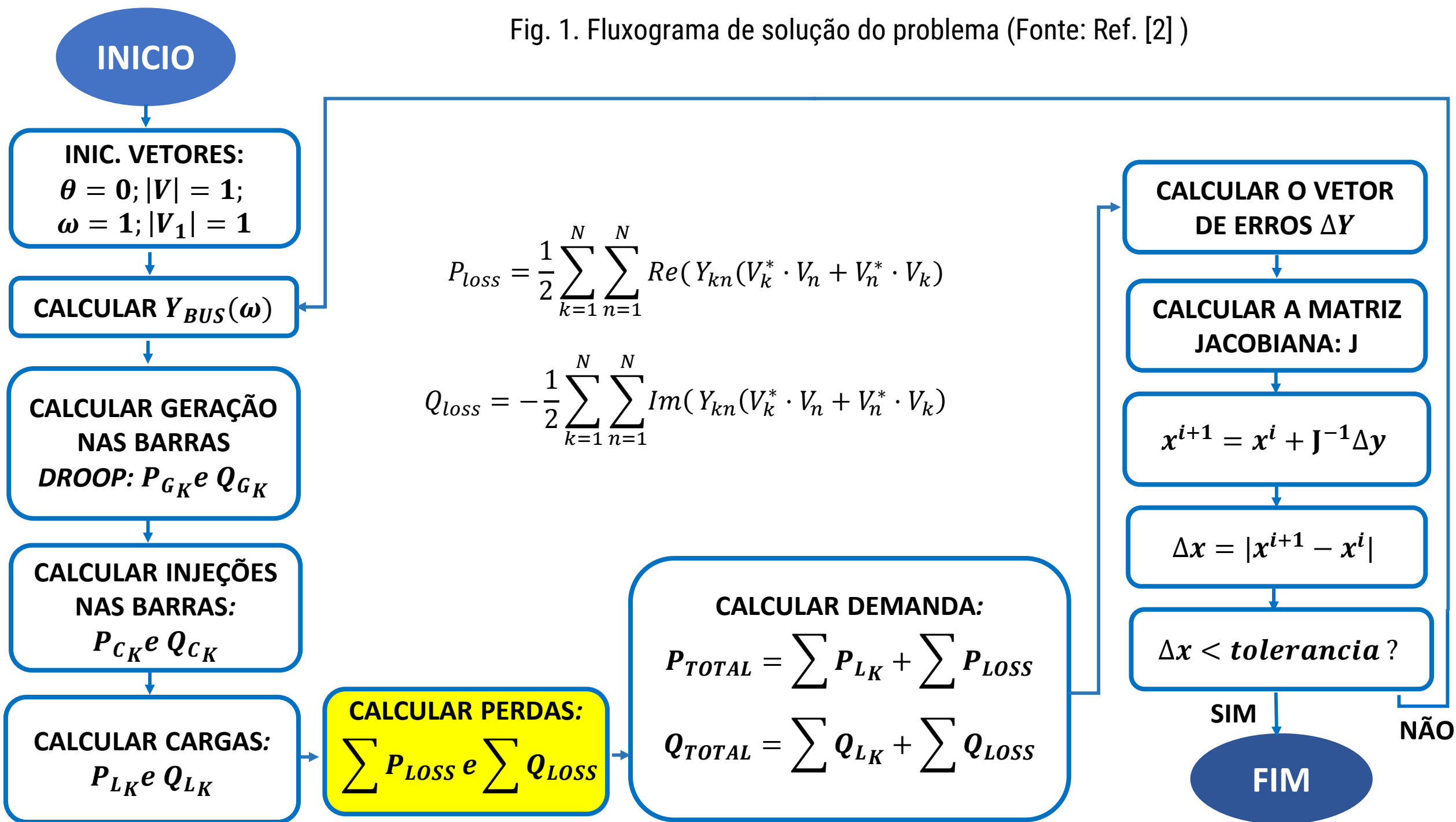


Fig. 1. Fluxograma de solução do problema (Fonte: Ref. [2])

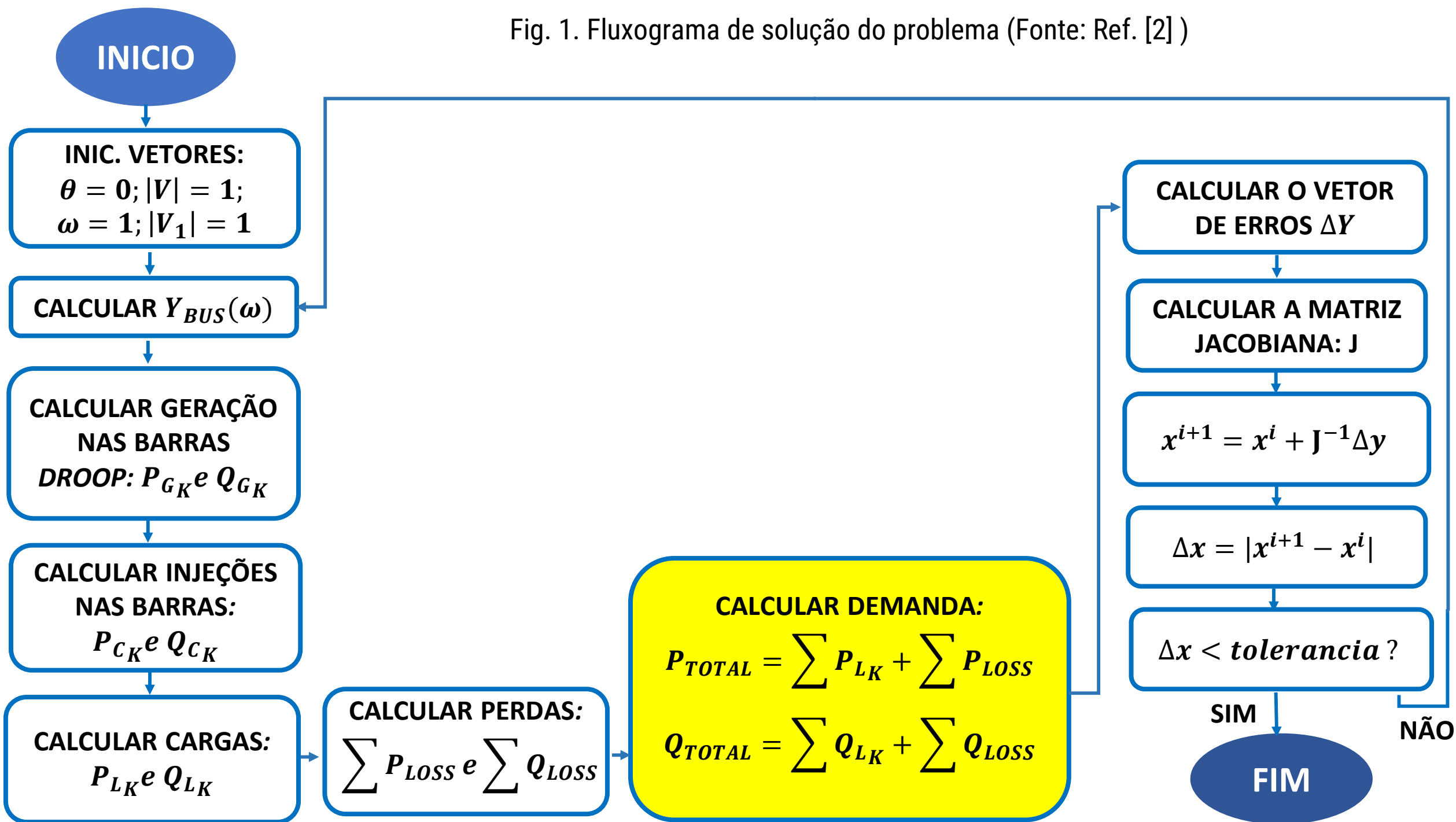


Fig. 1. Fluxograma de solução do problema (Fonte: Ref. [2])

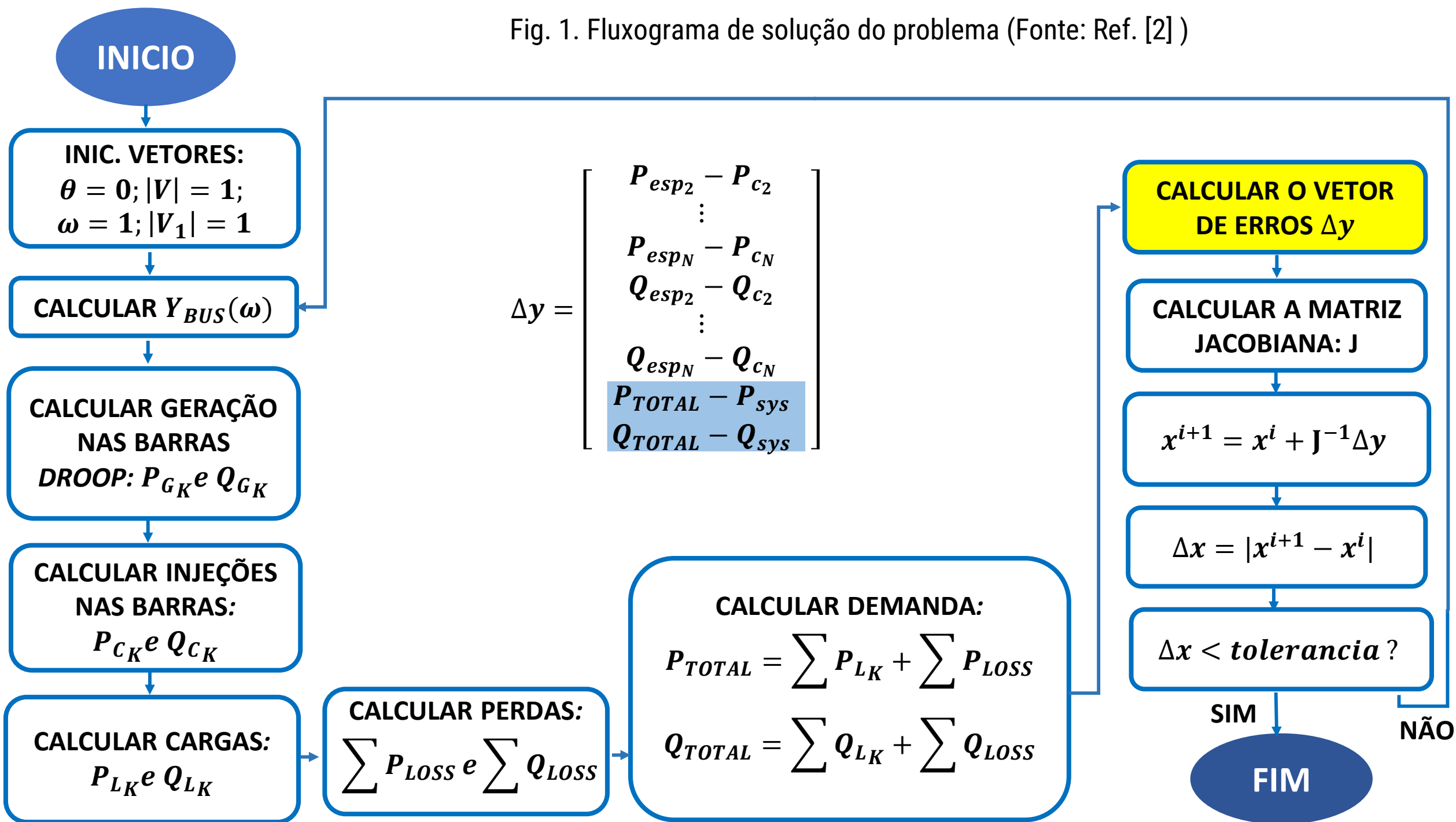


Fig. 1. Fluxograma de solução do problema (Fonte: Ref. [2])

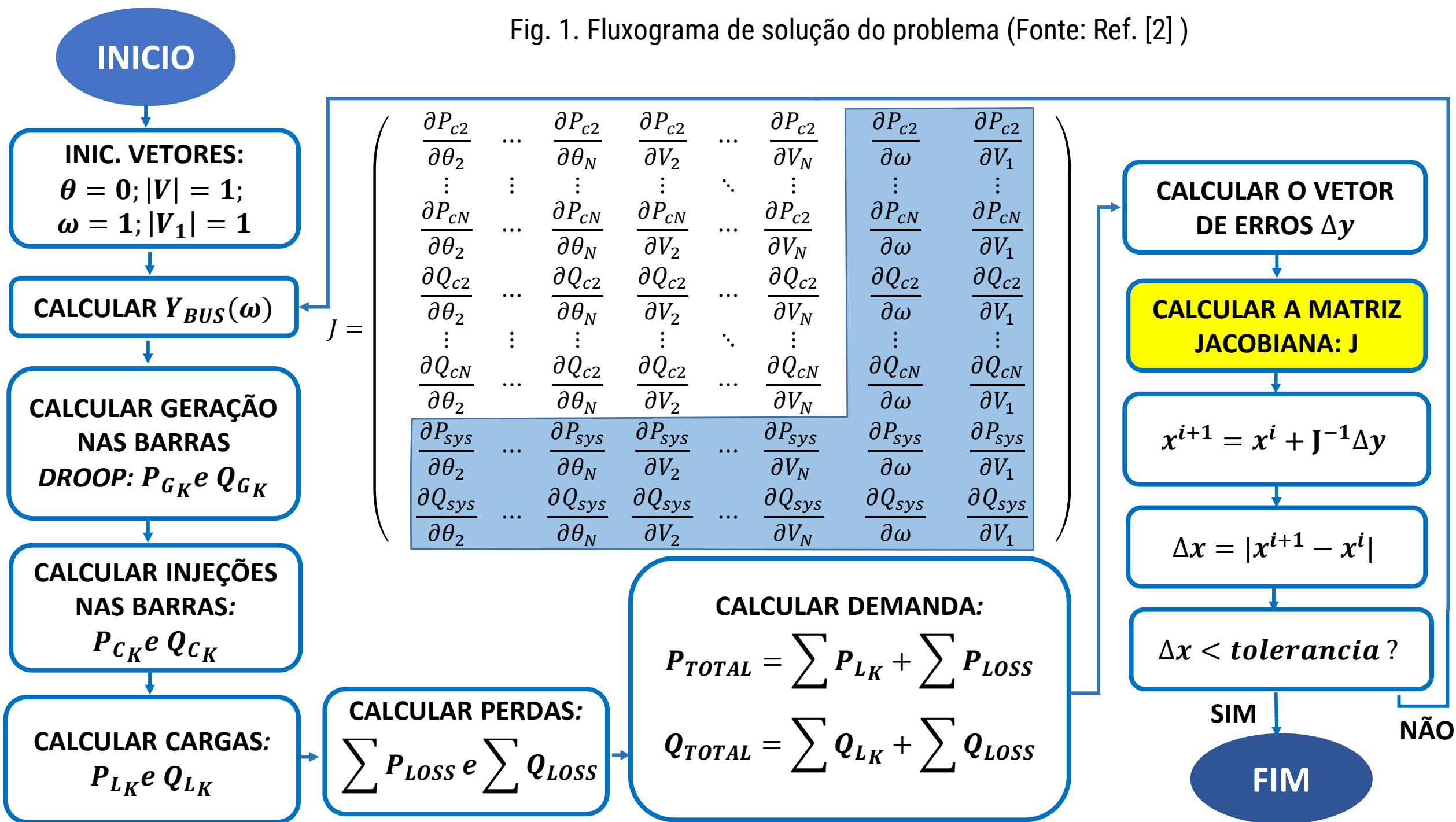


Fig. 1. Fluxograma de solução do problema (Fonte: Ref. [2])

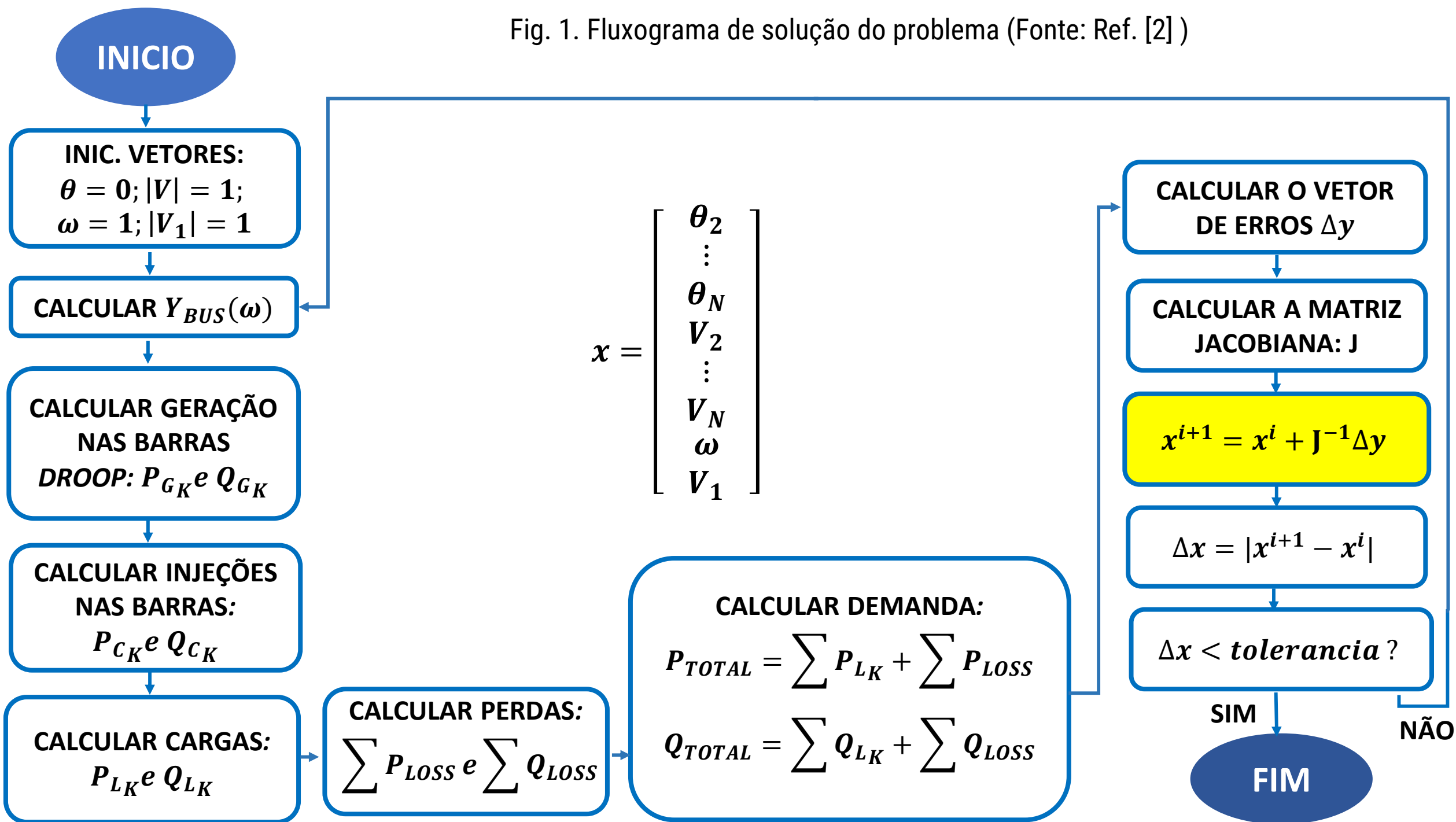


Fig. 1. Fluxograma de solução do problema (Fonte: Ref. [2])

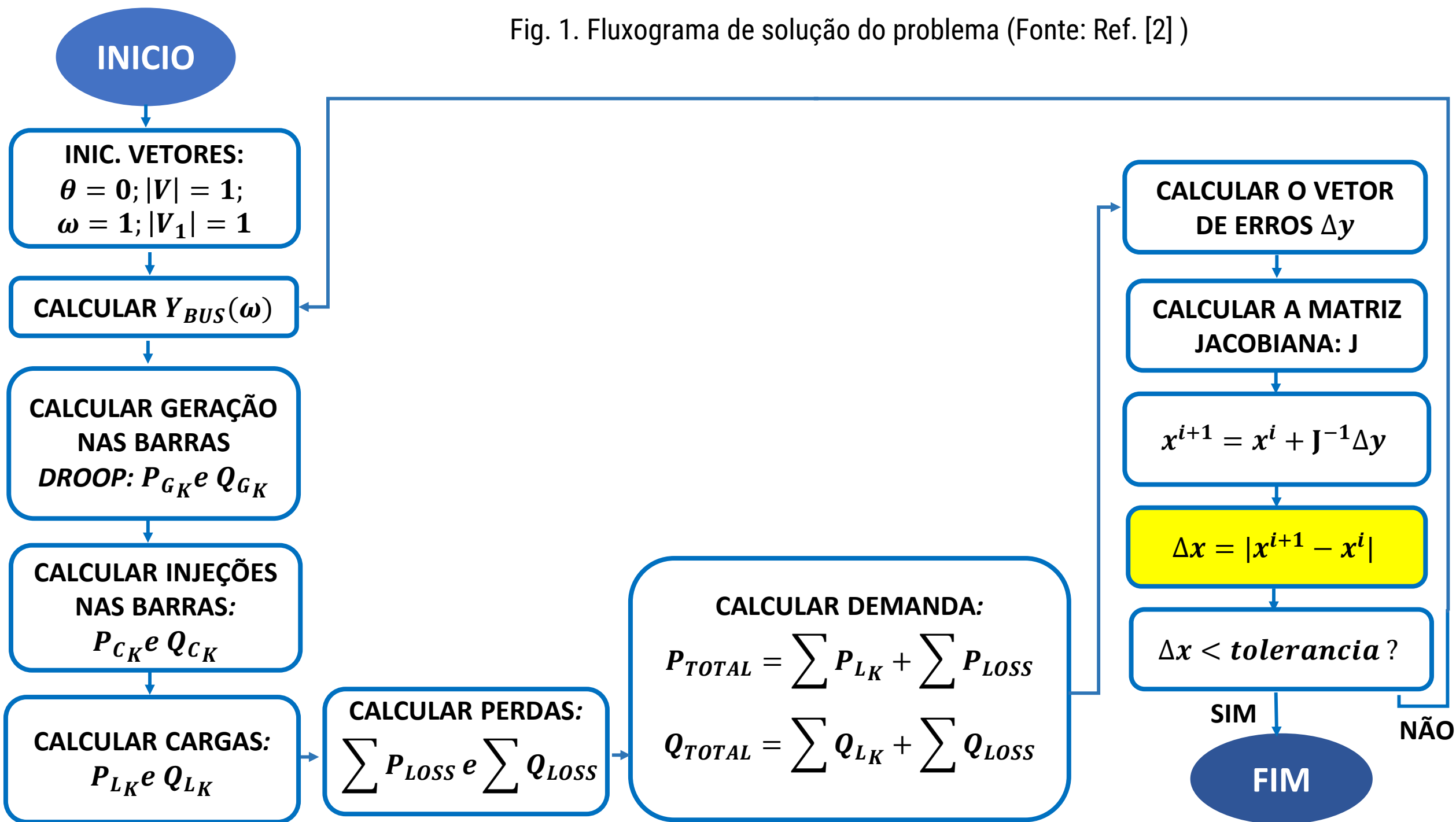
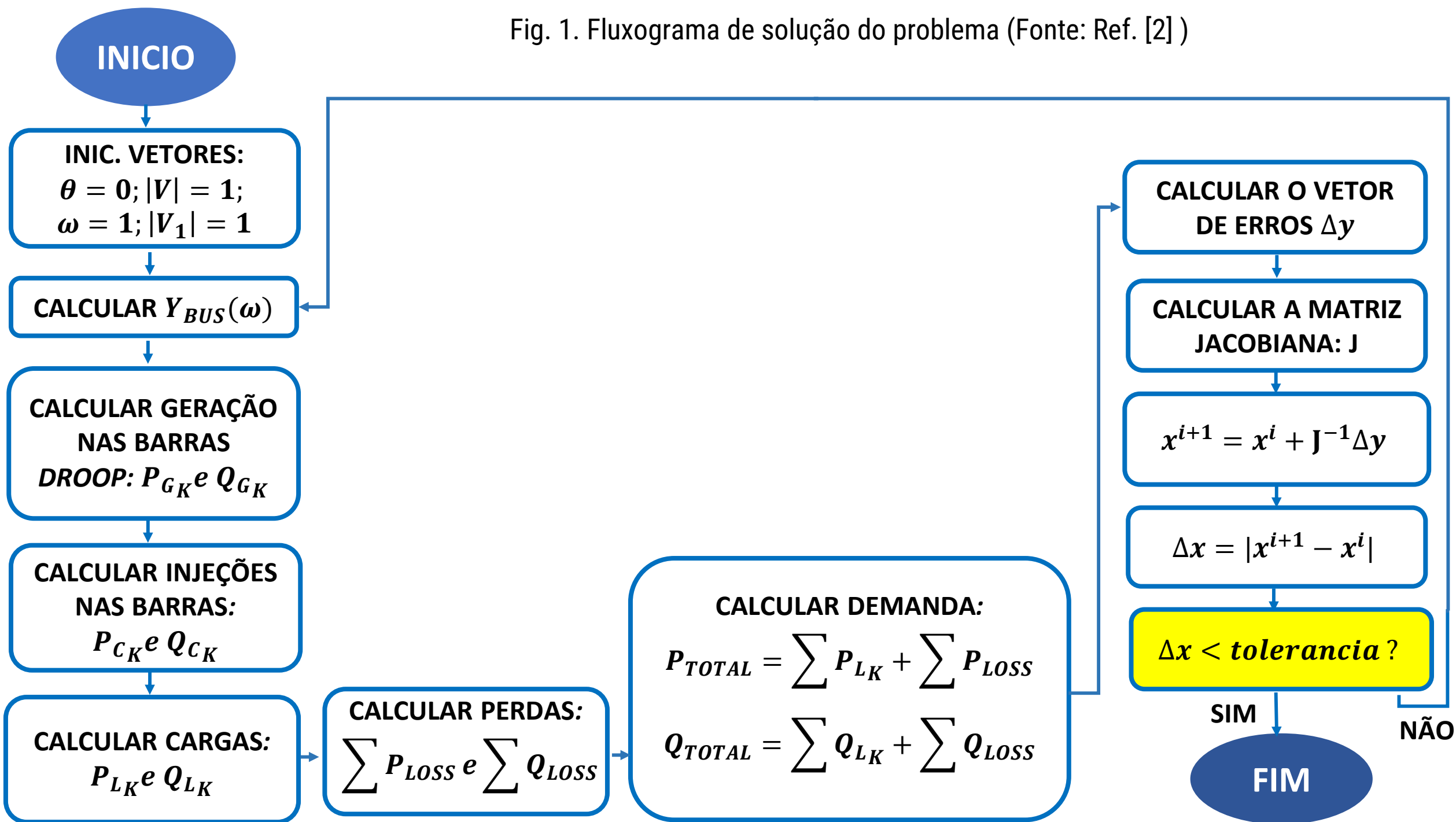


Fig. 1. Fluxograma de solução do problema (Fonte: Ref. [2])



Estudos de caso

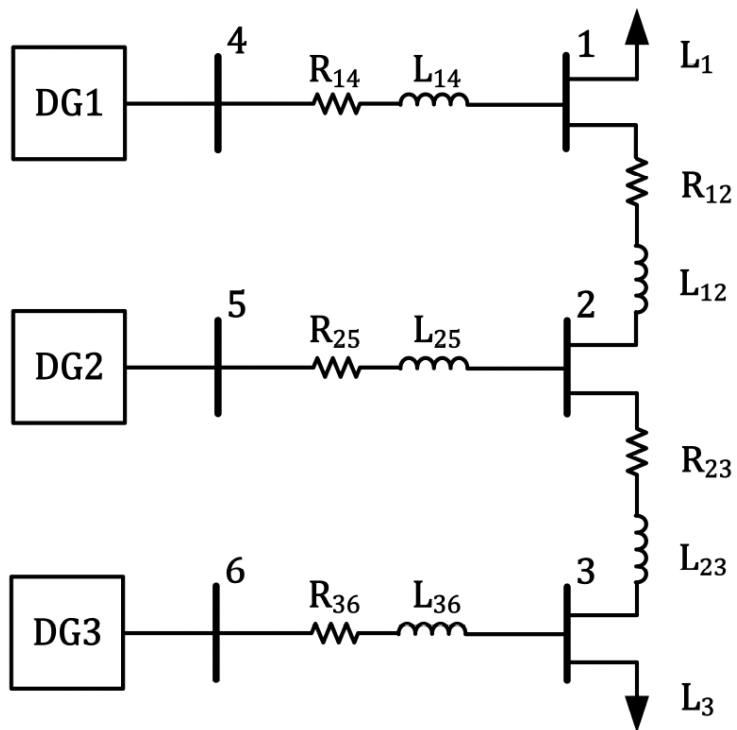


Fig. 3- Sistema-teste de 6 Barras (Fonte: Ref. [2])

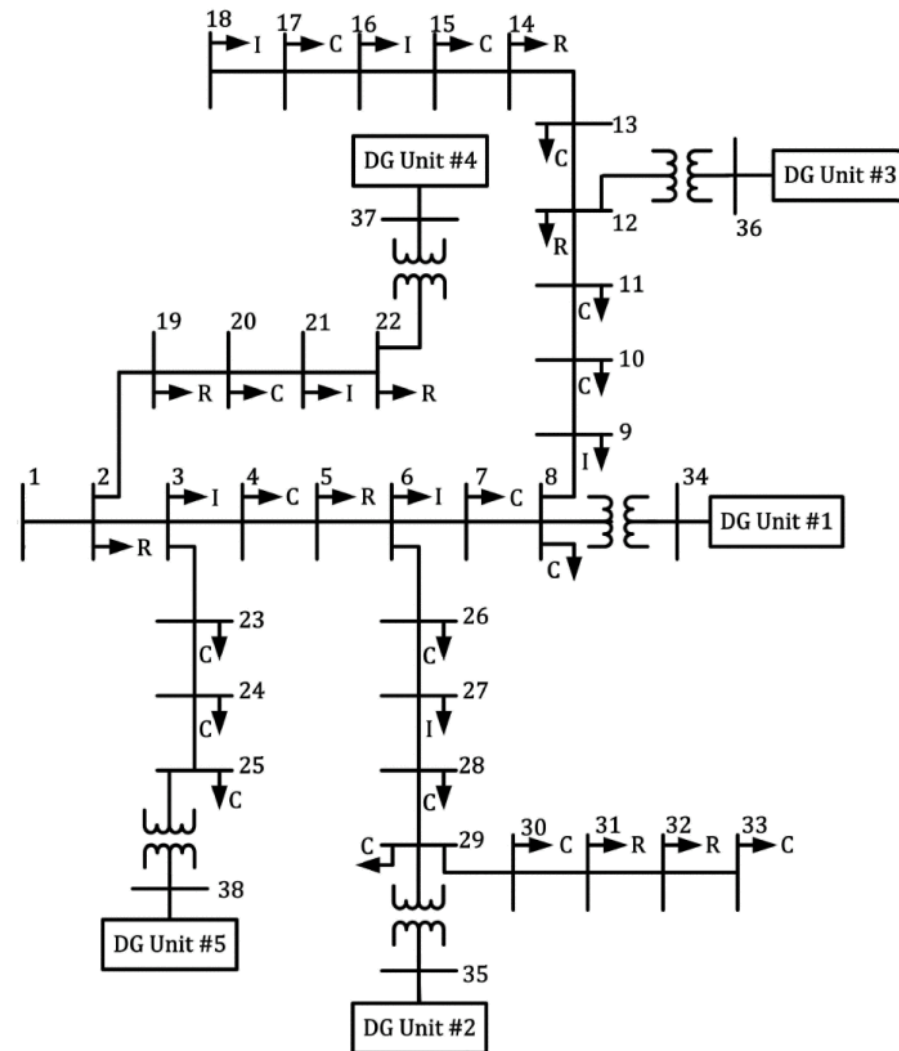


Fig. 4- Sistema-teste de 38 Barras (Fonte: Ref. [2])

Estudos de caso

Tabela III – Perdas Ativas conforme Barra V θ

Método	Perdas Ativas Totais (p.u)
MNR	0.281604
NR – Barra 4	0.291814
NR – Barra 5	0.290936
NR – Barra 6	0.274874

Tabela IV – Tipos de Barras

Barra	Tipo	
	MNR	NR
1	VF	PQ
2	PQ	PQ
3	VF	PQ
4	VF	PV
5	VF	PV
6	VF	V θ

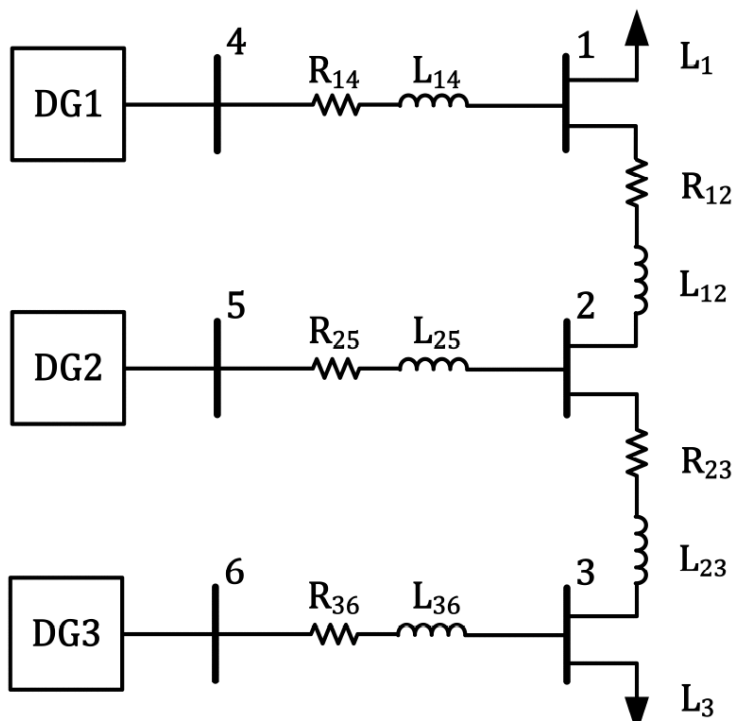


Fig. 3– Sistema-teste de 6 Barras (Fonte: Ref. [2])

$$P_{Gk} = \left(\sum_{k=1}^N P_{Lk_o} \right) / NG$$

$$P_{Lk}(\alpha, V_k, \omega = \omega_o) = P_{Lk_o} \left(\frac{|V_k|}{|V_{k_o}|} \right)^\alpha$$

$$Q_{Lk}(\beta, V_k, \omega = \omega_o) = Q_{Lk_o} \left(\frac{|V_k|}{|V_{k_o}|} \right)^\beta$$

$$\begin{aligned} \alpha &= 0 \text{ e } \beta = 0 \\ K_{pf} &= 1 ; K_{qf} = -1. \\ m_{P_k} &= 2,5 \cdot 10^{-4} \\ n_{q_k} &= 7.2 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Estudos de caso

Tabela III – Perdas Ativas conforme Barra V θ

Método	Perdas Ativas Totais (p.u)
MNR	0.281604
NR – Barra 4	0.291814
NR – Barra 5	0.290936
NR – Barra 6	0.274874

Tabela IV – Tipos de Barras

Barra	Tipo	
	MNR	NR
1	VF	PQ
2	PQ	PQ
3	VF	PQ
4	VF	PV
5	VF	PV
6	VF	V θ

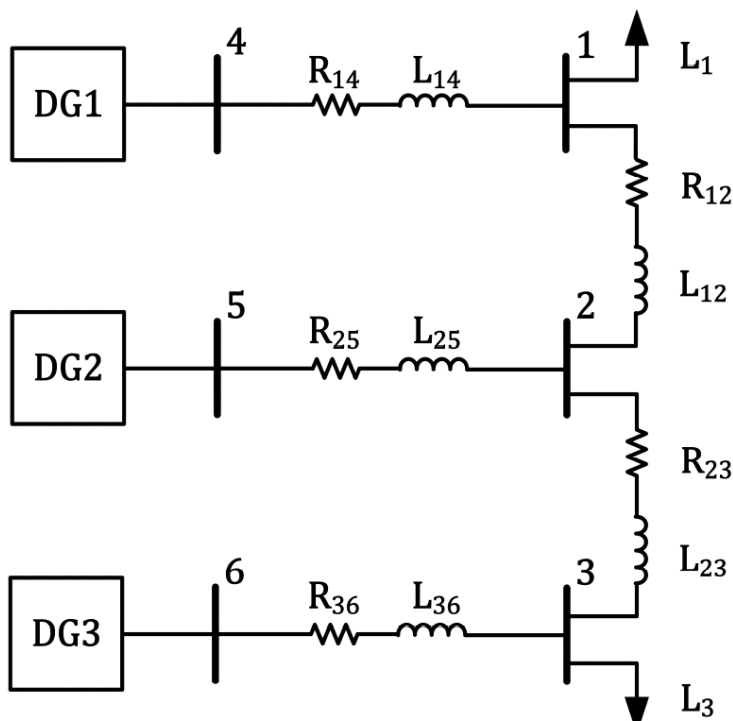


Fig. 3– Sistema-teste de 6 Barras (Fonte: Ref. [2])

$$P_{Gk} = \left(\sum_{k=1}^N P_{Lk_o} \right) / NG$$

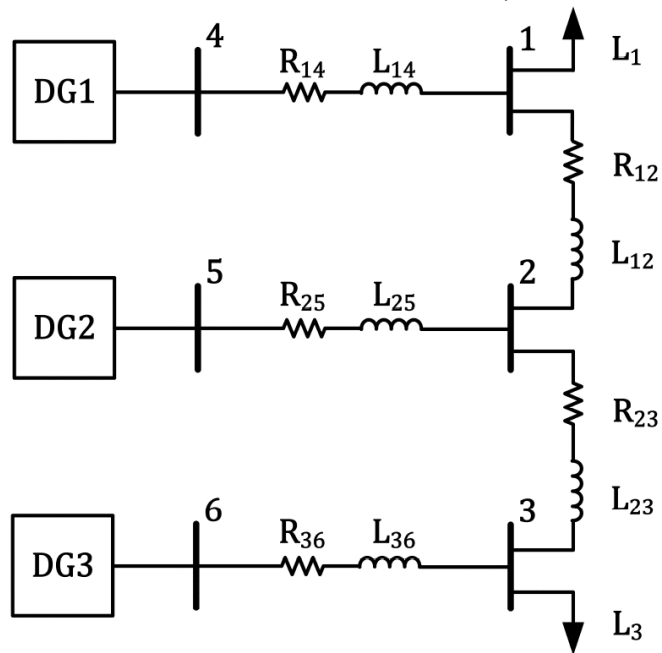
$$P_{Lk}(\alpha, V_k, \omega = \omega_o) = P_{Lk_o} \left(\frac{|V_k|}{|V_{k_o}|} \right)^\alpha$$

$$Q_{Lk}(\beta, V_k, \omega = \omega_o) = Q_{Lk_o} \left(\frac{|V_k|}{|V_{k_o}|} \right)^\beta$$

$$E_{abs.} = |S_{MNR} - S_{NR}|$$

$$E_{rel.}(\%) = 100 \cdot \left| \frac{S_{MNR} - S_{NR}}{S_{MNR}} \right|$$

Fig. 3– Sistema-teste de 6 Barras (Fonte: Ref. [2])



Barra	Tipo	
	MNR	NR
1	VF	PQ
2	PQ	PQ
3	VF	PQ
4	VF	PV
5	VF	PV
6	VF	Vθ

Estudos de caso

Tabela V – Estado calculado para o Sistema de 6 Barras

Barras	Tensões Nodais				Ângulos Nodais (graus)			
	MNR (p.u.)	NR (p.u.)	Erro absoluto (p.u.)	Erro relativo (%)	MNR (graus)	NR (graus)	Erro absoluto (graus)	Erro relativo (%)
1	0.956513	0.970744	$1 \cdot 10^{-2}$	1.4878	0	-0.138062	$1 \cdot 10^{-1}$	-
2	0.970280	0.984486	$1 \cdot 10^{-2}$	1.4642	-0.561295	-0.530922	$3 \cdot 10^{-2}$	5.4113
3	0.961006	0.993589	$3 \cdot 10^{-2}$	3.3905	-2.870452	-2.815042	$6 \cdot 10^{-2}$	1.9304
4	0.986045	1.000000	$1 \cdot 10^{-2}$	1.4152	-0.089377	-0.332170	$2 \cdot 10^{-1}$	271.6521
5	0.989277	1.000000	$1 \cdot 10^{-2}$	1.0839	-0.479837	-0.105163	$4 \cdot 10^{-1}$	78.0835
6	0.966951	1.000000	$3 \cdot 10^{-2}$	3.4179	-3.068925	-3.068925	0	0
Sistema	Frequência				Perdas Ativas			
	MNR (p.u.)	NR (p.u.)	Erro absoluto (p.u.)	Erro relativo (%)	MNR (p.u.)	NR (p.u.)	Erro absoluto (p.u.)	Erro relativo (%)
	0.999040	1.000000	$1 \cdot 10^{-3}$	0.0961	0.281604	0.274874	$7 \cdot 10^{-3}$	2.3896

Estudos de caso

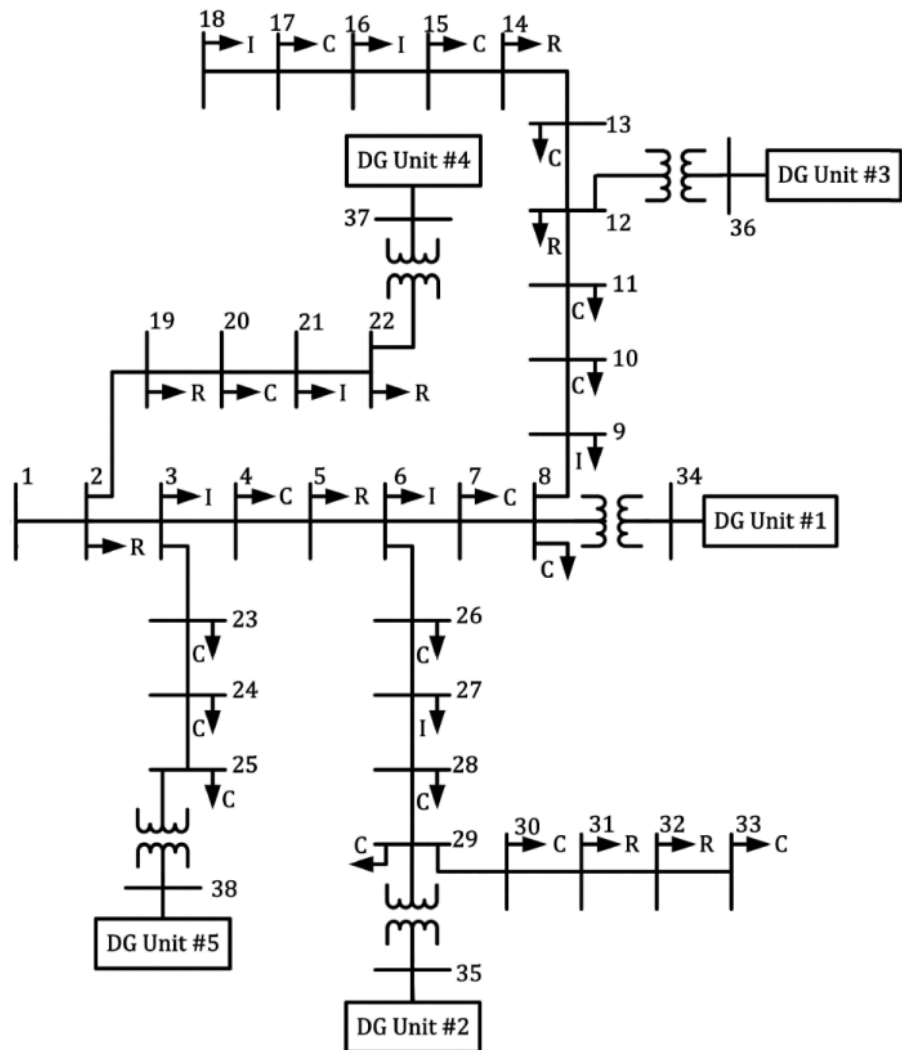


Fig. 4- Sistema-teste de 38 Barras (Fonte: Ref. [2])

Tabela VI – Perdas Ativas conforme Barra V θ

Método	Perdas Ativas Totais (p.u)
MNR	0.052064
NR - Barra 34	0.059351
NR - Barra 35	0.059379
NR - Barra 36	0.059328
NR - Barra 37	0.059368
NR - Barra 38	0.059457

$$\begin{aligned}
 &R (\alpha=0.92 \text{ e } \beta=4.04) \\
 &C (\alpha=1.51 \text{ e } \beta=3.40) \\
 &I (\alpha=0.18 \text{ e } \beta=6.00) \\
 &K_{pf} = 1 ; K_{qf} = -1. \\
 &m_{P_k} = 3 \cdot 10^{-3} ; n_{q_k} = 3 \cdot 10^{-2}
 \end{aligned}$$

Tabela VII – Tipos de Barras

Barra	Tipo	
	MNR	NR
1-33	VF	PQ
34	VF	PV
35	VF	PV
36	VF	V θ
37	VF	PV
38	VF	PV

$$P_{G_k} = \left(\sum_{k=1}^N P_{L_{k0}} \right) / NG$$

$$E_{abs.} = |S_{MNR} - S_{NR}|$$

$$E_{rel.(\%)} = 100 \cdot \left| \frac{S_{MNR} - S_{NR}}{S_{MNR}} \right|$$

Estudos de caso

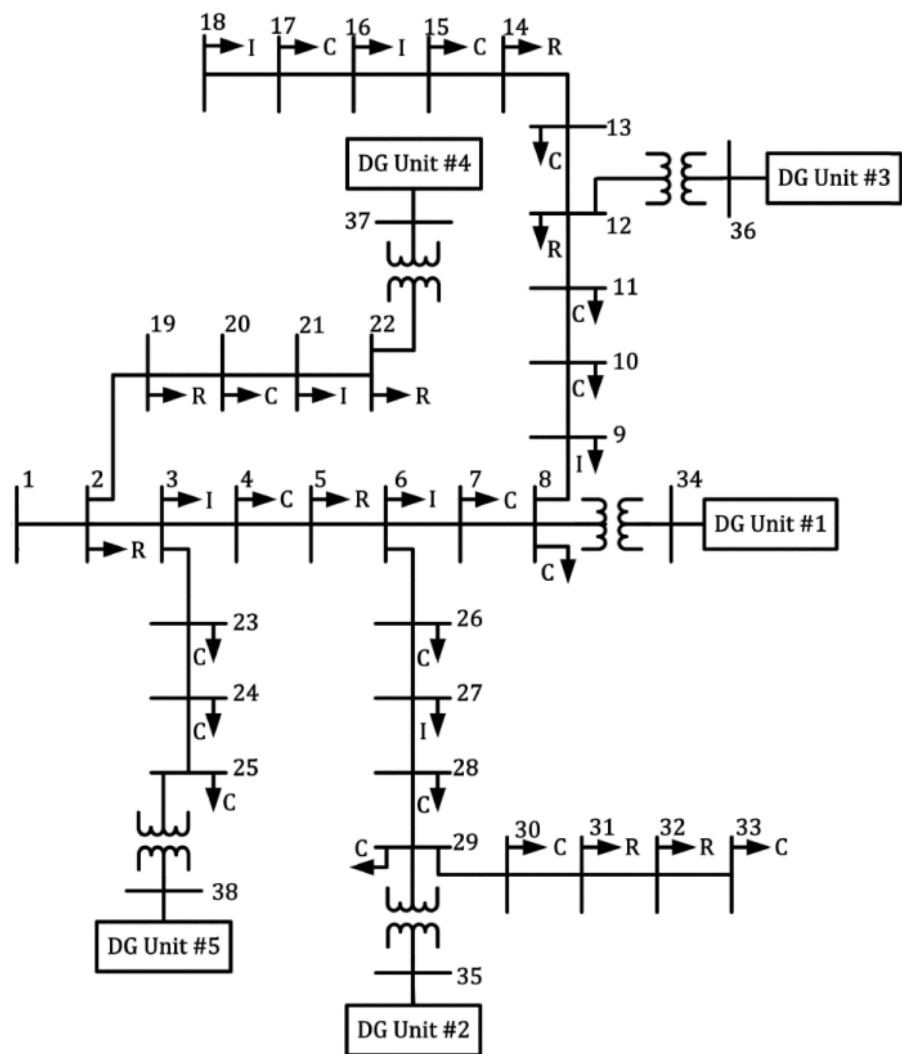


Fig. 4- Sistema-teste de 38 Barras (Fonte: Ref. [2])

Tabela VI – Perdas Ativas conforme Barra V θ

Método	Perdas Ativas Totais (p.u)
MNR	0.052064
NR - Barra 34	0.059351
NR - Barra 35	0.059379
NR - Barra 36	0.059328
NR - Barra 37	0.059368
NR - Barra 38	0.059457

Tabela VII – Tipos de Barras

Barra	Tipo	
	MNR	NR
1-33	VF	PQ
34	VF	PV
35	VF	PV
36	VF	V θ
37	VF	PV
38	VF	PV

$$P_{Lk}(\alpha, V_k, \omega = \omega_o) = P_{Lk_o} \left(\frac{|V_k|}{|V_{k_o}|} \right)^\alpha$$

$$Q_{Lk}(\beta, V_k, \omega = \omega_o) = Q_{Lk_o} \left(\frac{|V_k|}{|V_{k_o}|} \right)^\beta$$

$$P_{Gk} = \left(\sum_{k=1}^N P_{Lk_o} \right) / NG$$

$$E_{abs.} = |S_{MNR} - S_{NR}|$$

$$E_{rel.(\%)} = 100 \cdot \left| \frac{S_{MNR} - S_{NR}}{S_{MNR}} \right|$$

Estudos de caso

Tabela VIII – Estado calculado para o Sistema de 38 Barras

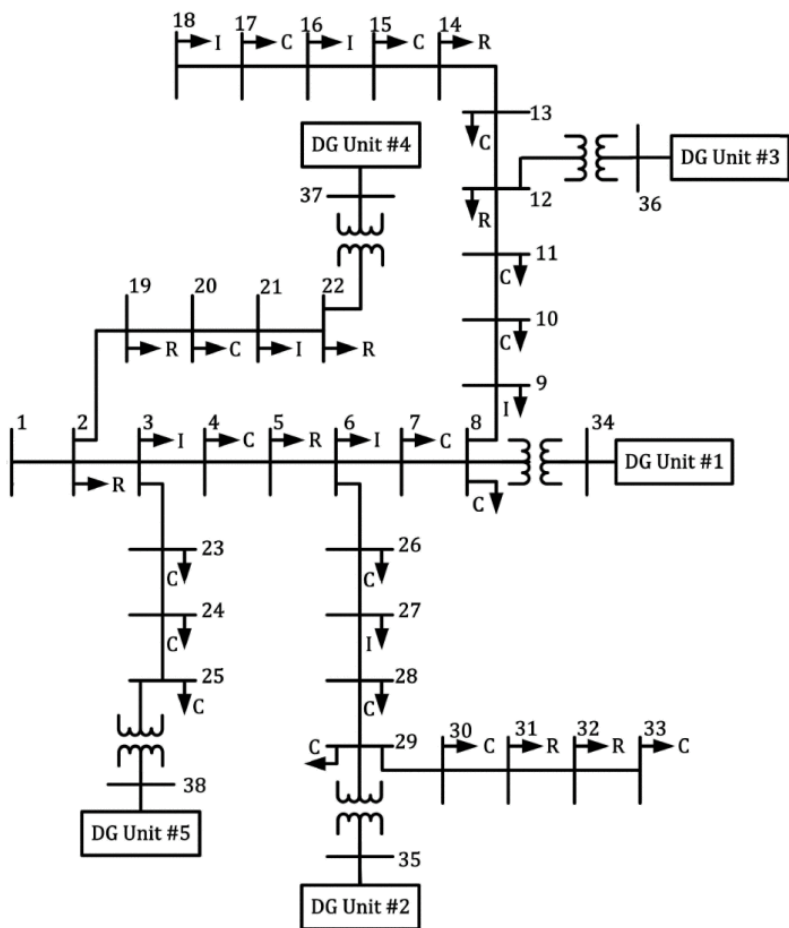


Fig. 4– Sistema-teste de 38 Barras
(Fonte: Ref. [2])

Barra	Tensões Nodais				Ângulos Nodais (graus)			
	MNR (p.u)	NR (p.u)	Erro absoluto (p.u)	Erro relativo (%)	MNR (p.u)	NR (p.u)	Erro absoluto (p.u)	Erro relativo (%)
1	0.973634	0.987205	$1 \cdot 10^{-2}$	1.3939	0.000000	-0.368050	$4 \cdot 10^{-1}$	-
2	0.973634	0.987205	$1 \cdot 10^{-2}$	1.3939	0.000003	-0.368050	$4 \cdot 10^{-1}$	$1.4704 \cdot 10^7$
6	0.972253	0.985133	$1 \cdot 10^{-2}$	1.3248	0.174709	-0.139580	$3 \cdot 10^{-1}$	179.8930
18	0.966244	0.976353	$1 \cdot 10^{-2}$	1.0462	-0.019464	-0.104424	$8 \cdot 10^{-2}$	436.5044
33	0.960365	0.974375	$1 \cdot 10^{-2}$	1.4588	0.363661	-0.040024	$4 \cdot 10^{-1}$	111.0058
34	0.989774	1.000000	$1 \cdot 10^{-2}$	1.0331	0.525938	0.385084	$1 \cdot 10^{-1}$	26.7815
35	0.984100	1.000000	$2 \cdot 10^{-2}$	1.6157	0.540418	0.032007	$5 \cdot 10^{-1}$	94.0773
36	0.991261	1.000000	$9 \cdot 10^{-3}$	0.8816	0.601918	0.601918	0	0.0000
37	0.990296	1.000000	$1 \cdot 10^{-2}$	0.9799	0.403985	0.265925	$1 \cdot 10^{-1}$	34.1745
38	0.981243	1.000000	$2 \cdot 10^{-2}$	1.9115	-0.211711	-0.975843	$8 \cdot 10^{-1}$	360.9313
Sistema	Frequência (p.u.)				Perdas Ativas (p.u.)			
	MNR (p.u)	NR (p.u)	Erro absoluto (p.u)	Erro relativo (%)	MNR (p.u)	NR (p.u)	Erro absoluto (p.u)	Erro relativo (%)
	0.997817	1.000000	$2 \cdot 10^{-3}$	0.2187	0.052064	0.059328	$7 \cdot 10^{-3}$	13.9515

Discussões, resultados parciais e conclusões

- O Método de Newton-Raphson Modificado apresenta modificações simples, mas extremamente validas;
- Sem restrições de aplicação em microrredes;
- Há disparidades entre as soluções apontadas pelos dois métodos em microrredes isoladas;
- Apesar parecerem pouco significantes, sabe-se que o estado sempre estará na faixa de 1 p.u e 0 graus; e
- O calculo Fluxo de Carga em Microrredes Isoladas, qual desconsidera as particularidades desta deve ter uso cauteloso.

Referências

- [1] M. M. A. Abdelaziz, H. E. Farag, E. F. El-Saadany and Y. A.-R. I. Mohamed, "A Novel and Generalized Three-Phase Power Flow Algorithm for Islanded Microgrids Using a Newton Trust Region Method," vol. 28, no. 1, pp. 190-201, Fevereiro 2013.
- [2] F. Mumtaz, M. H. Syed, M. A. Hosani and H. H. Zeineldin, "A Novel Approach to Solve Power Flow for Islanded Microgrids Using Modified Newton Raphson With Droop Control of DG," *IEEE Transactions on Sustainable Energy* , vol. 7, no. 2 , pp. 493 - 503, 2016.
- [3] D. Singh, R. K. Misra e D. Singh, "Effect of load models in distributed generation planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, nº 4, pp. 2204-2212, 2007.
- [4] W. F. Tinney and C. E. Hart, "Power Flow Solution by Newton's Method," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vols. PAS-86, no. 11, pp. 1449-1460, 1967.

OBRIGADA



Iasmim Almeida

almeidaiasmimtt@gmail.com