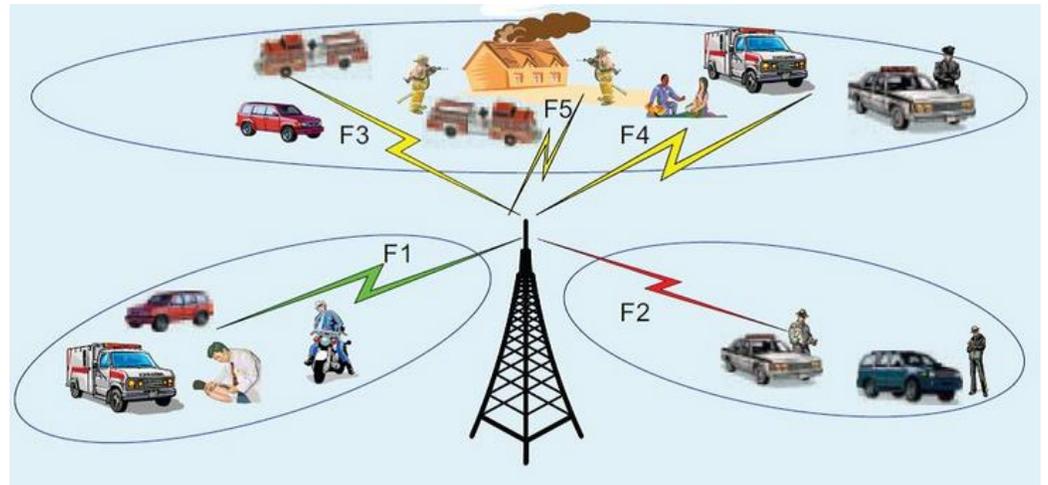


Trunking e Grau de Serviço

- Os sistemas de comunicações rádio-celulares são baseados no conceito de *trunking*, o qual **permite o acesso sob demanda a um grande número de usuários do espectro de rádio** (limitado, por natureza), compartilhando o uso de um número relativamente pequeno de canais disponíveis.
- Em um sistema de rádio baseado no conceito de *trunking*, cada usuário recebe um canal a cada chamada e, após a finalização da chamada, o canal previamente ocupado é imediatamente devolvido ao conjunto de canais disponíveis.
- O sistema de *trunking* **explora o comportamento estatístico** dos usuários, de tal forma que um número fixo de canais pode acomodar um número grande e aleatório de usuários.



Trunking e Grau de Serviço

- As **companhias telefônicas** utilizam a teoria de *trunking* para determinar o **número de circuitos telefônicos** que necessitam ser alocados para prédios de escritórios com centenas de telefones.
- Este mesmo princípio é utilizado no projeto de sistemas rádio celulares.
- Em tal sistema, há um **compromisso entre o número de circuitos de telefones disponíveis e a probabilidade de um particular usuário não encontrar circuitos disponíveis durante o período de pico de ocorrência de chamadas.**
- À medida que o número de linhas telefônicas diminui, se torna mais provável que todos os circuitos estejam ocupados para um particular usuário.
- Em um sistema de rádio móvel baseado no conceito de *trunking*, quando um particular usuário solicita o serviço e todos os canais de rádio já estão em uso, o usuário é **bloqueado**, tendo seu acesso ao sistema negado, ou ele é encaminhado para uma **fila de espera** até que um canal se torne disponível.

Erlang

- Os fundamentos da teoria de *trunking* foram desenvolvidos por Erlang, um matemático dinamarquês que, no final do século XIX, estudou como um grande número de fontes de informação poderia transmitir através de um número limitado de canais de transmissão.
- A medida de intensidade de tráfego leva o nome de Erlang.
- Um Erlang representa a intensidade de tráfego transportada (a quantidade de tráfego transportada) por um canal que está completamente ocupado.
- Por exemplo, um canal de rádio que está ocupado por trinta minutos durante uma hora, transporta um tráfego de 0.5 Erlangs.

Grau de Serviço

- O Grau de Serviço (GOS) é uma medida da “habilidade” de um usuário em acessar um sistema baseado em *trunking* durante a hora mais ocupada.
- A hora ocupada é aquela mais ocupada durante a semana, mês ou ano.
- O grau de serviço é uma referência utilizada para definir o desempenho desejado de um particular sistema baseado no conceito de *trunking*, através da especificação da probabilidade de um usuário obter acesso a um canal, dentre um específico número de canais disponíveis no sistema.
- É tarefa do projetista de um sistema *wireless* estimar a capacidade máxima requerida e alocar um número apropriado de canais para atingir o GOS.

- O GOS é tipicamente dado como:
 - a probabilidade de uma chamada ser **bloqueada**, ou
 - a probabilidade de uma chamada ser **submetida a um atraso maior** do que um determinado tempo de espera em uma fila.
- O sistema celular AMPS, por exemplo, foi projetado para um GOS de 2% de bloqueios.
- Isto implica que as alocações de canais por célula são projetadas de tal forma que duas em cem chamadas sejam bloqueadas devido à ocupação total dos canais, durante a hora de maior tráfego.

Intensidade de Tráfego Média de um Usuário

A intensidade de tráfego média gerada por cada usuário é igual à taxa de solicitação de chamadas, multiplicada pela duração média de uma chamada típica (*holding time*).

Ou seja, cada usuário gera, em média, uma intensidade de tráfego de A_u Erlangs dada por

$$A_u = \lambda H$$

Onde:

H é duração média de uma chamada e

λ é o número médio de solicitações de chamada por unidade de tempo para cada usuário.

Há dois tipos de sistemas baseados em *trunking* comumente utilizados:

O primeiro tipo **não oferece a possibilidade de espera em uma fila** para as chamadas solicitadas e não atendidas.

Este tipo de sistema é denominado *Blocked Calls Cleared*.

O segundo tipo é aquele em **que é formada uma fila** para conter as chamadas que são bloqueadas.

Este tipo de sistema é denominado *Blocked Calls Delayed*.

Sistemas baseados em *trunking* que não oferecem a possibilidade de espera em uma fila para as chamadas solicitadas:

- Neste tipo de sistema, para cada usuário que solicita um serviço, é assumido que não há um tempo de *setup* e que o usuário recebe imediatamente o acesso ao canal, se há um canal disponível.
- Se não há canais disponíveis, o usuário solicitante é **bloqueado**, ficando sem acesso e habilitado unicamente a tentar novamente mais tarde.

Este tipo de sistema de *trunking* é chamado ***Blocked Calls Cleared***.

No sistema de *trunking Blocked Calls Cleared* é assumido que há um número infinito de usuários, da seguinte maneira:

- (a) as solicitações de acesso ao sistema são sem memória, implicando que todos os usuários, incluindo os usuários bloqueados, possam requisitar uma chamada a qualquer tempo;
- (b) a probabilidade de um usuário ocupar um canal é exponencialmente distribuída, de tal forma que chamadas mais demoradas são menos prováveis de ocorrer (conforme seria descrito por uma distribuição exponencial);
- (c) há um número finito de canais disponíveis, em um grupo de canais.

Este tipo de sistema conduz à derivação da **fórmula Erlang B** (também conhecida como a fórmula *Blocked Calls Cleared*).

A fórmula Erlang B determina a **probabilidade de uma chamada ser bloqueada e é medida pelo GOS**, para um sistema baseado no conceito de *trunking* que **não** provê uma fila para chamadas bloqueadas.

A fórmula **Erlang B** é expressa por

$$\Pr[\text{bloqueio}] = \frac{\frac{A^C}{C!}}{\sum_{k=0}^C \frac{A^k}{k!}} = GOS$$

onde:

C é o número de canais de um sistema de rádio baseado no conceito de *trunking* e

A é o tráfego total gerado.

É possível modelar um sistema baseado no conceito de *trunking* considerando-se um número finito de usuários, no entanto:

- as expressões resultantes acabam por ser **muito mais complicadas** do que as expressões para o modelo Erlang B,
- o modelamento se torna inadequado para casos em que o número de usuários é muitas ordens de magnitude maior do que o de canais disponíveis
- **a expressão Erlang B para um número finito de usuários provê uma estimativa conservadora do GOS**, à medida que os resultados sempre predizem uma menor probabilidade de bloqueios do que aquela que pode, de fato, ocorrer.

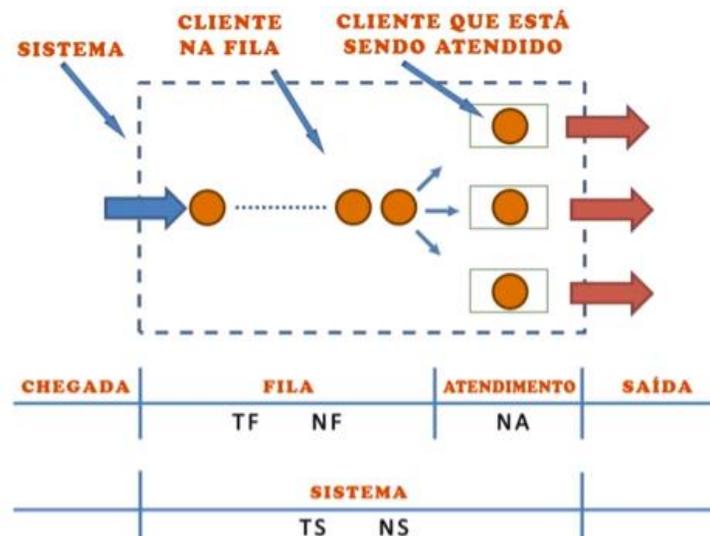
A capacidade de um sistema de rádio baseado no conceito de *trunking*, onde as chamadas bloqueadas são perdidas é mostrada na Tabela 1 (**Capacidade de um Sistema Erlang B**), para vários possíveis valores de GOS e n^{os} de canais.

Número de Canais C	Capacidade (Erlangs) para GOS			
	= 0.01	= 0.005	= 0.002	= 0.001
2	0.153	0.105	0.065	0.046
4	0.869	0.701	0.535	0.439
5	1.36	1.13	0.900	0.762
10	4.46	3.96	3.43	3.09
20	12.0	11.1	10.1	9.41
24	15.3	14.2	13.0	12.2
40	29.0	27.3	25.7	24.5
70	56.1	53.7	51.0	49.2
100	84.1	80.9	77.4	75.2

Sistemas baseados em *trunking* em que é formada uma fila para conter as chamadas que são bloqueadas:

Se um canal não está disponível imediatamente, a solicitação de chamada pode ser atrasada até que um canal se torne disponível.

Este tipo de sistema de *trunking* é chamado *Blocked Calls Delayed*, e sua medida de GOS é definida como a probabilidade de que uma chamada seja bloqueada após esperar um intervalo de tempo específico na fila.



Para determinar o GOS de um sistema *Blocked Calls Delayed*, é necessário determinar a probabilidade de uma chamada ter o acesso imediato ao sistema negado.

A probabilidade de uma chamada não receber acesso imediato a um canal é determinada pela expressão denominada *Erlang C*, expressa na equação a seguir

$$\Pr[\textit{atraso} > 0] = \frac{A^C}{A^C + C! \left(1 - \frac{A}{C}\right) \sum_{k=0}^{C-1} \frac{A^k}{k!}}$$

Se não há canais imediatamente disponíveis, a chamada é atrasada.

A probabilidade de que a chamada atrasada seja forçada a esperar mais do que t segundos é dada pela probabilidade de uma chamada ser atrasada multiplicada pela probabilidade condicional de o atraso ser maior do que t segundos.

A probabilidade de que uma chamada seja atrasada por um tempo maior do que t segundos é dada por:

$$\Pr[\textit{atraso} > t] = \Pr[\textit{atraso} > 0] \Pr[\textit{atraso} > t \mid \textit{atraso} > 0]$$

$$\Pr[\textit{atraso} > t] = \Pr[\textit{atraso} > 0] e^{-(C-A)t/H}$$

Onde

H é a duração média de uma chamada,

C é o nº de canais por célula ou setor de um sistema de rádio baseado no conceito de *trunking* e

A é o tráfego total gerado por célula ou setor.

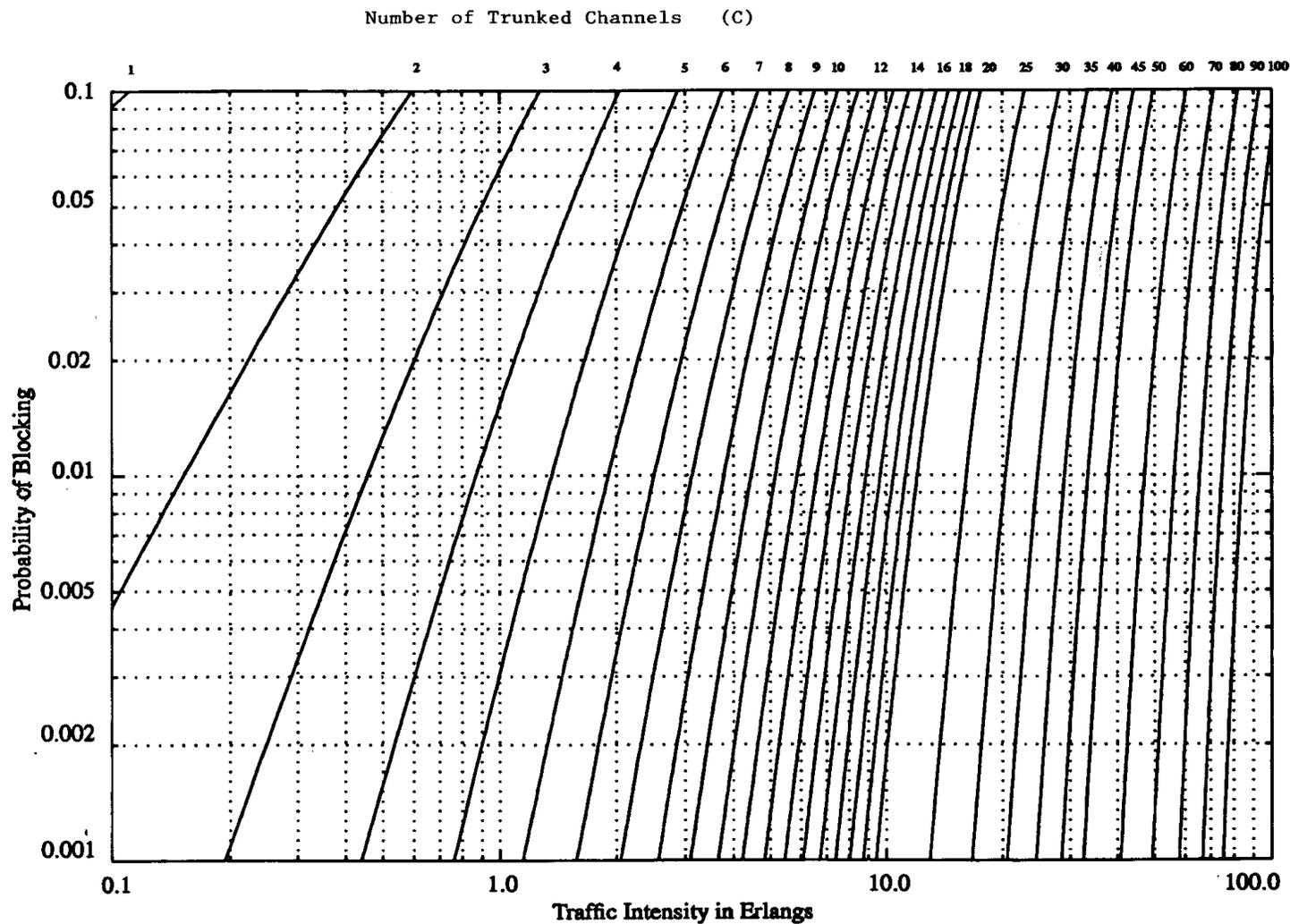
$Pr[atraso > t]$ representa o GOS de um sistema *trunked* onde chamadas bloqueadas são atrasadas.

O atraso médio D para todas as chamadas em um sistema que opera por meio de filas é dado por

$$D = Pr[atraso > 0] \frac{H}{C - A}$$

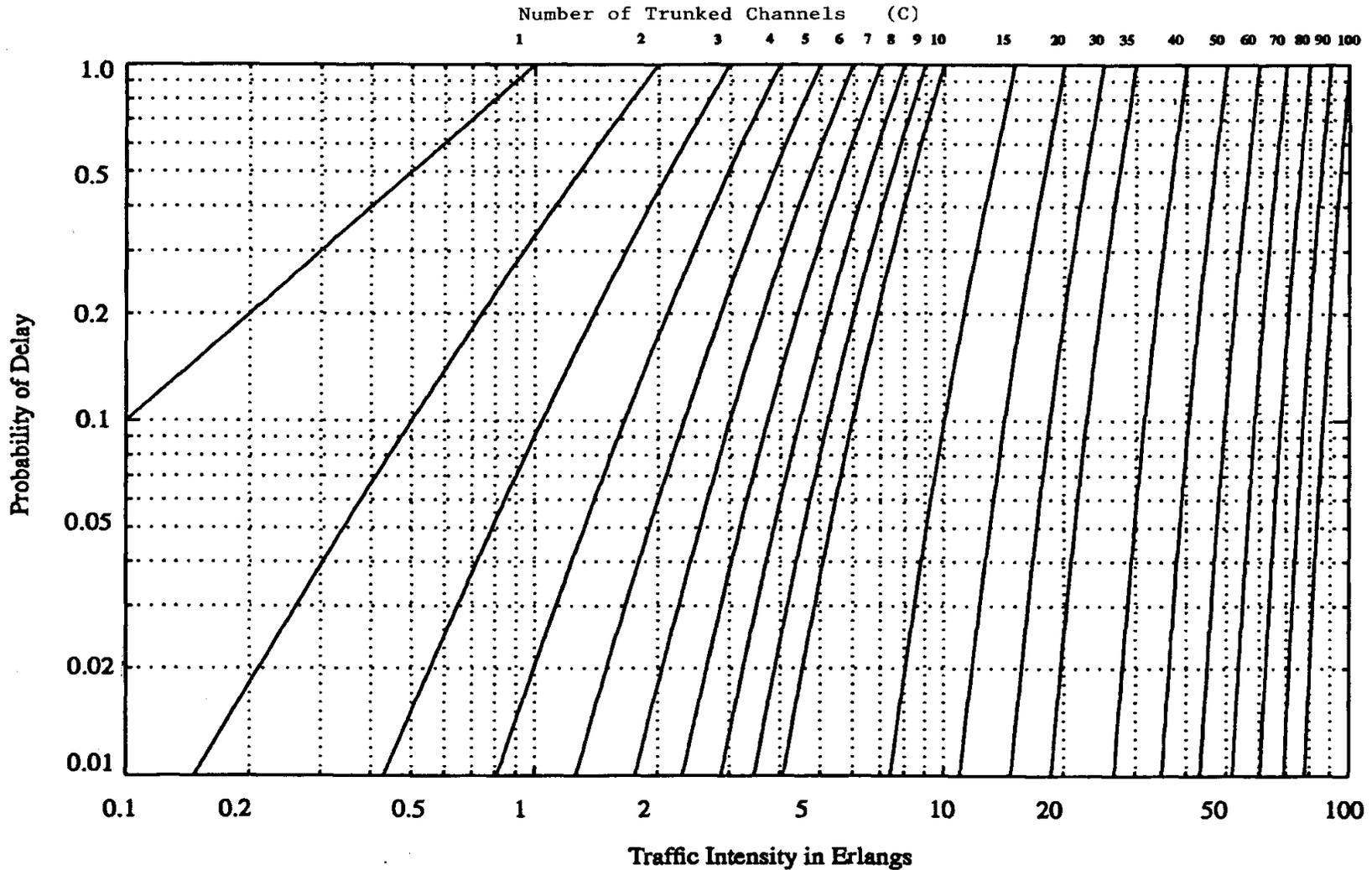
onde o **atraso médio** para aquelas chamadas que são colocadas na fila é dado por $H/(C - A)$.

A fórmula Erlang B é plotada graficamente na Figura abaixo.



Carta para o modelo Erlang B, mostrando a probabilidade de bloqueio como uma função do número de canais e da intensidade de tráfego em Erlangs.

A fórmula Erlang C é plotada graficamente na Figura abaixo.



Carta para o modelo Erlang C, mostrando a probabilidade de uma chamada ser atrasada como uma função do número de canais e da intensidade de tráfego em Erlangs

Os gráficos mostrados nas figuras são úteis para determinar o GOS de forma rápida, embora simulações computacionais sejam frequentemente utilizadas para determinar comportamentos transientes experimentados por usuários particulares em um sistema móvel.

Para usar as cartas para os modelos Erlang B e Erlang C, procede-se de acordo com o seguinte algoritmo:

- (1) localiza-se o **número de canais** na parte superior do gráfico;
- (2) localiza-se a **intensidade do tráfego** do sistema na base do gráfico;
- (3) encontra-se a **probabilidade de bloqueio** $P_r[\textit{bloqueio}]$ na abcissa da Figura 1 **ou**
- (4) encontra-se a **probabilidade de uma chamada não receber acesso imediato ao sistema** $P_r[\textit{atraso}] > 0$, na abcissa da Figura 2.

A eficiência de *trunking* é uma medida do número de usuários aos quais pode ser oferecido um particular GOS, com uma particular configuração de canais fixos.

A forma pela qual os canais são agrupados altera substancialmente o número de usuários que podem ser atendidos por um sistema baseado na técnica de *trunking*, e é um fator de grande impacto na capacidade global do sistema.

Por exemplo, a partir da Tabela 1, pode-se verificar que:

- 10 canais operando sob a filosofia de *trunking* a um GOS de 0.01 podem suportar 4.46 Erlangs de tráfego, enquanto que
- 2 grupos de 5 canais podem suportar 2×1.36 Erlangs, ou 2.72 Erlangs de tráfego.
- Ou seja, 10 canais operando de acordo com a filosofia de *trunking* suportam 60% mais tráfego, a um dado GOS, do que 2 sistemas com 5 canais cada.

Número de Canais C	Capacidade (Erlangs) para GOS			
	= 0.01	= 0.005	= 0.002	= 0.001
5	1.36	1.13	0.900	0.762
10	4.46	3.96	3.43	3.09

Trunking e Grau de Serviço - Exemplo

Quantos usuários podem ser suportados para uma probabilidade de bloqueio de 0.5%, para os seguintes números de canais, operando sob a filosofia de *trunking* em um sistema *Blocked Calls Cleared*? Assuma que cada usuário gera 0.1 Erlangs de tráfego. (a) $C = 4$, (b) $C = 10$.

A partir da Tabela 1, pode-se encontrar a capacidade total em Erlangs para um GOS de 0.5%, para diferentes números de canais.

Através do uso da relação $A = UA_u$, pode-se obter o número total de usuários que podem ser suportados no sistema.

(a) Dado $C = 4$, $A_u = 0.1$, $GOS = 0.005$.

A partir da Tabela 1 ou da Figura 1, obtém-se $A \approx 0.7$.

Portanto, o número total de usuários,

$$U = A/A_u \cong 0.7/0.1 = 7 \text{ usuários.}$$

(b) Dado $C = 10$, $A_u = 0.1$, $GOS = 0.005$.

A partir da Tabela 1 ou da Figura 1, obtém-se $A \approx 3.96$.

Portanto, o número total de usuários,

$$U = A/A_u \cong 3.96/0.1 = 39 \text{ usuários.}$$