

COMENTÁRIOS À PROPOSTA DA ANEEL SUBMETIDA À AUDIÊNCIA PÚBLICA 046/2004

Ao definir, no passado recente, a remodelação da estrutura do sistema elétrico, cometeu-se o equívoco de arbitrar que:

- A potência “instantânea” *máxima*, num transformador, ou numa linha, é um número absoluto e bem definido, independente das condições de operação, determinado segundo procedimentos estabelecidos em normas e regulamentos.
- A operação real deve respeitar esse *limite*.
- As condições contratuais e comerciais se baseiem diretamente neste limite.

Além de outras distorções técnicas e econômicas, quanto a investimento e operação do sistema elétrico, o equívoco cometido impede, praticamente, a utilização racional de linhas e transformadores, vedando o aproveitamento da capacidade de sobrecarga natural, nomeadamente em contingências.

Neste contexto, a proposta da ANEEL em causa visa estabelecer critérios para definir a *potência máxima de curta duração* de transformadores e linhas aéreas, aplicável, naturalmente em condições de emergência. A justificação da necessidade desses critérios é óbvia, e, nesse sentido, a intenção de resolver o problema merece concordância.

Todavia, os critérios para definir a *potência máxima de curta duração* constantes da proposta da ANEEL tomam como base equívocos conceituais básicos, pelo que se corre o risco de aumentar os efeitos desses equívocos e de, em vez de resolver o problema que suscitou a proposta, criar soluções e procedimentos inadequados, sem resolver satisfatoriamente o assunto. Nesse sentido, afigura-se-me pertinente a discussão que passo a apresentar.

Para situar os meus comentários, considero necessário mencionar alguns condicionamentos conjunturais do setor elétrico atual, no Brasil e no Mundo, que podem induzir uma separação entre os critérios de investimento e de gestão e a realidade em que vivemos, e, eventualmente, provocar decisões e opções equivocadas, pseudo-otimizações e degradação da qualidade do setor.

Um primeiro equívoco foi tentar enquadrar o setor elétrico num mercado simplista e meramente especulativo, em que os produtos envolvidos são avaliados apenas por uma quantidade expressa numa unidade simples, e comercializados em “bolsa”, por valor unitário. Em muitos casos, o valor acaba por ser predominantemente influenciado pelo jogo especulativo dos apostadores e não por condicionamentos econômicos robustos. Os exemplos recentes da Califórnia e da ENRON, de parte do mercado de transmissão nos Estados Unidos, de resultados da pressão exercida pela burocracia da União Europeia no sentido de os respectivos países adotarem os modelos da Califórnia e da ENRON, e de diversos apagões graves, por exemplo nos Estados Unidos e Europa, foram elucidativos da importância deste equívoco. Algumas atitudes recentes começam a evidenciar tentativas de correção, embora limitadas e tímidas.

Outro tipo de equívoco está relacionado com o conceito de *norma*, e abrangência e conseqüências das *normas*.

Uma das concepções de *norma*, aplicada em diversos países e organismos internacionais, encara a *norma* como um consenso de um conjunto de pessoas ligadas ao assunto, e destinada a ser utilizada a critério e sob responsabilidade do usuário, que é livre para a usar ou não, e, em contrapartida, é responsável pelo seu eventual uso. Por exemplo, grande parte das *normas* dos Estados Unidos (*American National Standard*) tem um preâmbulo do seguinte tipo:

An American National Standard implies a consensus of those substantially concerned with its scope and provisions. An American National Standard is intended as a guide to aid the manufacturer, the consumer and the general public. The existence of an American National Standard does not in any respect preclude anyone, whether he has approved the standard or not, from manufacturing, marketing, purchasing, or using products, processes, or procedures not conforming to the standard.

Uma outra concepção de *norma*, infelizmente difundida no Brasil e em outros países, encara a *norma* como algo mandatário, acima do bem e do mal, em que há que acreditar, como *dogma*, e que há que adotar, sem direito a aplicar a regra cartesiana da dúvida sistemática. Quem a seguir a *norma* é irresponsável pelas conseqüências, mesmo que envolvam mortes, como por exemplo numa ocorrência em França em que morreram cerca de duzentas pessoas. Quem não a seguir comete crime, mesmo que corrija erros da *norma*. Esta concepção dogmática lembra a condenação de Giordano Bruno a morrer na fogueira, em 1600, por ter defendido a hipótese de existência de muitos sistemas semelhantes ao sistema solar, o que foi considerado desrespeito a *dogmas* em vigor.

Não há inconveniente na segunda concepção de *norma*, quando a mesma cobrir alguns tipos de assuntos, por exemplo quando se trate, essencialmente, de uma definição destinada a evitar ambigüidade de terminologia. É o caso de definição de unidades físicas, no sentido de precisar como são verificados os padrões respectivos, ou do significado de uma designação de um material, no sentido de explicitar a composição ou o procedimento de fabrico e os ensaios a que é submetido.

Todavia, a segunda concepção de norma torna-se inadequada, em minha opinião, quando aplicada a aspectos e conseqüências que envolvam as leis da física. Legislar, neste caso, só seria legítimo se a Natureza se compromettesse a seguir a lei. O Homem deve procurar seguir as leis da Natureza, mas é inadequado determinar que a Natureza siga leis estabelecidas pelo Homem.

Um exemplo concreto, relacionado com o assunto em causa, mostra a diferença entre condições em que a norma mandatária não tem inconvenientes, e condições em que a norma mandatária é inadequada.

Consideremos o caso clássico da definição de *parâmetros nominais* de um transformador (tensão, corrente, potência aparente, etc.). A definição clássica, e que resultou da sabedoria resultante do reconhecimento das limitações humanas, consiste em dizer que os *parâmetros nominais* são os que constam da chapa de características. Faz sentido estabelecer uma norma dizendo que os transformadores especificados segundo essa *norma* devem satisfazer a determinados condicionamentos de ensaio claramente explicitados. Por exemplo:

- Com ar a determinada temperatura, determinada distância mínima a obstruções a circulação de ar, etc., estando o transformador com tensão e corrente nominais, etc., determinadas temperaturas, medidas de determinada forma, deverão ser inferiores a determinados limites, etc., o que deve ser comprovado, ou comprovável, por ensaio.
- Com o transformador a temperatura ambiente, etc., o mesmo deve suportar a aplicação de determinado número de impulsos de tensão com determinada forma, o que deve ser comprovado, ou comprovável, por ensaio, etc. .
- Etc..

Este tipo de norma não determina nada quanto aos fenômenos físicos envolvidos, que seguem as leis da Natureza, mas permite definir o significado real dos *parâmetros nominais* e a responsabilidade do fabricante, com eventuais conseqüências comerciais. O uso adequado do transformador depende de muitos outros condicionamentos específicos da aplicação, e não é de responsabilidade do fabricante.

É inadequado, em contrapartida, associar diretamente a potência nominal de um transformador à potência máxima de operação normal, independentemente das condições específicas de utilização. Uma *norma* que estipule que a potência máxima de operação normal é igual à potência nominal,

independentemente dos condicionamentos específicos, extrapola o domínio de legitimidade das *normas*. Pode ser cômodo em termos burocráticos, mas pode conduzir a uma rede não otimizada e a uma má utilização de investimentos e ou a qualidade operacional deficiente. Estão em causa conseqüências econômicas e técnicas muito importantes, para serem ignoradas em favor de uma eventual comodidade burocrática.

É também inadequado associar a potência máxima de um transformador a uma temperatura instantânea máxima, no pressuposto, equivocado, de que se considera um “limite adequado do envelhecimento instantâneo”.

As condições de utilização racionais e otimizadas de transformadores impõem uma modelagem satisfatória dos fenômenos físicos envolvidos, e do comportamento determinístico e estatístico da carga e dos parâmetros meteorológicos ao longo da vida útil, e modéstia para reconhecer e estimar as limitações da modelagem utilizada, e da incerteza com que é possível prever o futuro. Decretar a forma de determinar essas condições, de maneira simplista e divorciada das leis da Natureza, é um equívoco que deve ser repudiado.

O comprador ou a concessionária, e ou as entidades responsáveis pelas opções de planejamento e de operação, devem analisar adequadamente a expectativa de utilização do transformador ao longo da sua vida útil, caracterizando margens de imprecisão significativas, e condições normais de operação e situações anômalas (incluindo eventuais contingências, de diversos tipos) e definir, coerentemente, opções adequadas de especificação do transformador e de elementos complementares (incluindo reguladores de tensão, equipamento de manobra e proteção, transformadores de corrente). Por exemplo:

- Num transformador elevador de uma usina poderá não se justificar considerar hipóteses de contingência com potência superior à potência máxima de operação normal.
- Num transformador interligando redes com condicionamentos hidrológicos diferenciados, poderá justificar-se considerar uma hipótese de operação com duração de alguns meses, mas com probabilidade de ocorrência moderada, com potência de operação sensivelmente superior à potência máxima na maioria dos anos. Provavelmente, será adequado especificar os transformadores de intensidade e o eventual regulador de tensão em carga com corrente nominal sensivelmente superior à corrente nominal do transformador, e tomar precauções de especificação ligadas com *aparentes pormenores* construtivos do transformador.
- Numa subestação com *n* conjuntos trifásicos de transformadores monofásicos, em paralelo, e com uma unidade monofásica de reserva, poderá ser adequado considerar uma hipótese de contingência com duração correspondente ao tempo de substituição de uma unidade monofásica.
- Numa subestação que alimente a carga de uma determinada região, será adequado considerar a forma específica do diagrama de cargas diário, semanal e anual, a variação de temperatura diária e anual, a expectativa de crescimento da carga, e a caracterização estatística dos aspectos aleatórios de variação de carga e temperatura, e definir, em conseqüência, uma potência máxima de operação normal sensivelmente superior à potência nominal do transformador. Provavelmente, será adequado especificar os transformadores de intensidade e o eventual regulador de tensão em carga com corrente nominal sensivelmente superior à corrente nominal do transformador, e tomar precauções de especificação ligadas com *aparentes pormenores* construtivos do transformador.

Afigura-se-me inadequado, em termos técnicos e econômicos, estabelecer fatores de sobrecarga, em relação à potência nominal, quer em condições normais, quer em contingência, independentes das condições específicas de utilização do transformador.

No caso de linhas aéreas, à parte a diferença de condicionamentos e características físicas e as inerentes conseqüências quantitativas, são essencialmente aplicáveis os comentários anteriores, respeitantes a transformadores. Por outro lado, há aspectos adicionais importantes, resultantes da interação da linha com a sua vizinhança, em grandes extensões, afetando condicionamentos de segurança e de interação

com o meio ambiente, diferentemente do que sucede com transformadores, situados em subestações, de acesso restrito. Incluem-se, nestes aspectos adicionais, os efeitos da corrente e condições meteorológicas na temperatura dos condutores e, conseqüentemente, nas distâncias ao solo, com influência nas condições de segurança de pessoas e de impacto ambiental, nomeadamente no que respeita a circulação de pessoas, máquinas agrícolas, veículos automotores em estradas, navegação fluvial, campo eletromagnético na vizinhança do solo, instalações industriais, risco de curto-circuito por proximidade do solo ou de vegetação na faixa de passagem, risco de incêndio resultante de curto-circuito.

Obviamente, os aspectos adicionais acima mencionados têm diferentes graus de relevância, e, além disso, são, em grande parte, afetados por parâmetros correlatos, o que simplifica a análise do assunto. Todavia, também quanto a estes aspectos adicionais, os requisitos de necessidade de análise e de opções adequadas são conceitualmente similares aos requisitos indicados a respeito dos transformadores.

Além disso, no caso de linhas, pode ser totalmente inadequado supor que a temperatura máxima dos condutores, para condições normais de operação, não excede o que normalmente se designa por *temperatura nominal* da linha. Noto, por exemplo, que:

- Em condições meteorológicas que ocorrem na maior parte do Brasil, a temperatura dos condutores, com corrente nula, pode exceder 60 °C. No caso de *temperatura nominal* 50 °C, mesmo com corrente nula, a temperatura do condutor pode exceder a *temperatura nominal*.
- Em caso de curto-circuito, fato com que há que conviver em operação normal, há um aumento importante de temperatura, rápido, com um arrefecimento subseqüente lento.
- Nas duas hipóteses anteriores, a distância dos condutores ao solo é inferior à distância de *norma* com *temperatura nominal*.

Em suma, em relação às linhas de transmissão, as concessionárias, e ou as entidades responsáveis pelas opções de planejamento e de operação, devem analisar adequadamente a expectativa de utilização da linha ao longo da sua vida útil, caracterizando margens de imprecisão significativas, e condições normais de operação e situações anômalas (incluindo eventuais contingências, de diversos tipos) e definir, coerentemente, opções adequadas de projeto da linha e de especificação de elementos complementares (incluindo eventuais sistemas de compensação em série e em derivação, equipamento de manobra e proteção, transformadores de corrente).

Afigura-se excessivamente simplista e parcialmente equivocada a forma como a ANEEL propõe que seja encarados e definida a *corrente máxima de curta duração* e os correspondentes limites de utilização de transformadores e linhas aéreas em condições de contingência.

Além dos condicionamentos básicos gerais mencionados acima, que, só por si, justificam, em minha opinião, uma revisão da proposta apresentada pela ANEEL, há diversos aspectos da metodologia particular de cálculo, explicitada nos anexos A e B, que, mesmo dentro da ótica restrita considerada nos mesmos, considero justificarem os comentários que passo a apresentar.

Em primeiro lugar, noto que se afigura excessivamente simplista e um tanto arbitrário:

- Determinar que a *corrente máxima de curta duração* corresponde a uma diminuição de 0,59 m *das distâncias de segurança verticais*, em relação que à *corrente máxima de longa duração*.
- Afirmar que a redução de distância mencionada corresponde a um aumento de temperatura do condutor 16,4 °C .
- Estabelecer um fator multiplicativo (fator de sobrecorrente) “obtido pela relação entre os dois valores de corrente, o de Curta Duração e o de Longa Duração, determinados através de simulação, para diversos tipos de cabos condutores e diversas temperaturas de projeto”.

- Determinar que:

- a) “Os limites de carregamento das LTs de qualquer classe de tensão entre 69 kV e 750 kV, para operação em regimes de curta duração, serão dados pelos limites de carregamento para o regime normal de operação, multiplicados pelo fator multiplicativo (fator de sobrecorrente), conforme a Temperatura de Projeto, de acordo com a tabela a seguir: “

Temperatura de projeto (°C)	50	55	60	64	65	70	75	80	90
Fator	1,42	1,33	1,26	1,24	1,23	1,19	1,17	1,15	1,12

- b) “Estes fatores independem da bitola dos condutores utilizados ou do seu tipo (AAC, ACSR ou ACAR).”

Para fundamentar, objetivamente e a título exemplificativo, as minhas restrições ao que é “determinado” nos anexos A e B da Nota Técnica nº 028/2004 – SRT ANEEL, apresento, no Anexo 1, um extrato dos resultados que obtive para quatro exemplos de comportamento de linhas aéreas, quanto a temperatura dos condutores e a flecha, em função da corrente, em regime permanente.

Nestes exemplos considerou-se dois tipos de condutores e dois valores do parâmetro c da catenária, numa condição de referência de montagem do cabo, correspondente a temperatura 20 °C , após estabilização, sem vento.

Para cada exemplo, traduzindo uma combinação de tipo de condutor e parâmetro c , considerou-se quatro valores de vão.

Em todos os exemplos admitiu-se condutor com superfície envelhecida e condições atmosféricas idênticas, correspondentes, nomeadamente, a: ar a 40 °C , vento ortogonal ao condutor com velocidade 0,6 m/s , radiação solar direta ortogonal ao condutor com intensidade 1 kW/m², e várias hipóteses adicionais que considere razoáveis e não extremas.

Os resultados apresentados mostram claramente que, pelo menos para a grande maioria do território brasileiro, é irrealista considerar que haja linhas cuja temperatura máxima de operação, em regime permanente, seja 50 °C . Nos quatro exemplos, a temperatura do condutor, com corrente nula, excede 60 °C , para condições atmosféricas que não são excepcionais.

Os resultados mostram, também, que é muito afastada da realidade a hipótese de supor que a relação entre o fator de sobrecarga associado a determinado aumento de flecha (em relação a uma condição de projeto), depende apenas da temperatura máxima de projeto. Embora se trate apenas de quatro exemplos, com muitas condições análogas ou similares, a sensibilidade relativa da corrente em regime permanente ao acréscimo de flecha, para igual temperatura de projeto (suposta traduzir uma temperatura aproximadamente máxima, calculada corretamente) varia, nesses exemplos, numa gama relativa da ordem de um para três.

Desta forma, afigura-se adequado rever as bases utilizadas pela ANEEL para as “determinações” incluídas na sua proposta, incluindo, não só, as hipóteses e aspectos considerados para a definição de eventuais critérios de sobrecarga, como, também, a fundamentação específica da análise dos aspectos particulares que considerou.

Também como exemplo de um dos vários aspectos que não são considerados na proposta da ANEEL, apresento, no Anexo 2, um extrato de resultados de três exemplos de comportamento de linhas aéreas, quanto a relação entre a temperatura dos condutores após um curto-circuito, T_{c2} , e a corrente de curto-circuito, I , para diversos valores da temperatura do condutor antes do curto-circuito, T_{c1} .

Nestes exemplos considerou-se três tipos de condutores e duração de curto-circuito $\Delta t = 1$ s . Para diferentes valores de Δt , a relação entre T_{c2} e I pode ser obtida das figuras apresentadas considerando

que, para igual temperatura do condutor antes do curto-circuito, T_{c1} , a temperatura T_{c2} é, praticamente, função de $I^2 \Delta t$. Desta forma, para $\Delta t \neq 1$ s, o valor de I é igual ao obtido no gráfico, para iguais valores de T_{c1} e T_{c2} , dividido por $\sqrt{\Delta t}$ (para Δt expresso em segundo).

Nota-se que, embora o curto-circuito tenha duração da ordem de 1 s, o arrefecimento subsequente é relativamente lento, e a flecha máxima atingida é aproximadamente igual à correspondente a regime permanente com temperatura igual a T_{c2} , e, até, um pouco mais elevada, devido à aceleração vertical do condutor ao atingir a flecha que corresponderia a equilíbrio à temperatura T_{c2} .

Os resultados apresentados mostram claramente que, pelo menos para grande parte das linhas, o aumento de flecha resultante de um curto-circuito pode ser da mesma ordem de grandeza do aumento de flecha resultante de sobrecarga. Para efetivamente se encarar com objetividade os condicionamentos de flecha, sob o ponto de vista de segurança real, há que levar em conta os curto-circuitos e os aspectos que os condicionam. Por exemplo, a corrente de curto-circuito varia muito acentuadamente ao longo da linha.

Noto que os cálculos que serviram de base aos resultados exemplificativos apresentados nos Anexos 1 e 2 foram efetuados considerando diretamente modelos físicos básicos dos fenômenos envolvidos, abstraindo, deliberadamente, de quaisquer critérios de tipo “norma”.

Complementarmente, e embora se trate de aspecto não relacionados diretamente com os meus comentários anteriores, noto que, na descrição de metodologias constante da Nota Técnica, houve, aparentemente, diversos lapsos de revisão, a maioria dos quais facilmente detectáveis, e que, aparentemente, no cálculo de temperatura do condutor não é considerada a convecção natural, que é importante para velocidade reduzida do vento.

Em suma, considero necessário que uma eventual proposta da ANEEL sobre o assunto em causa se fundamente em conceitos básicos diferentes dos que serviram de base à proposta apresentada, no sentido dos comentários que apresentei, e sugiro que a ANEEL reformule, em consequência, a proposta.

Rio de Janeiro, 09/02/2005

Carlos Portela

Anexo 1

EXEMPLOS DE COMPORTAMENTO DE LINHAS PARA EVIDENCIAR CONDICIONAMENTOS DE APLICABILIDADE DA PROPOSTA DA ANEEL

Neste anexo apresenta-se um extrato de resultados de quatro exemplos de comportamento de linhas aéreas, quanto a temperatura dos condutores e a flecha, em função da corrente, em regime permanente, para evidenciar condicionamentos de aplicabilidade da proposta da ANEEL.

Nestes exemplos considerou-se dois tipos de condutores e dois valores do parâmetro c da catenária, numa condição de referência de montagem do cabo, correspondente a temperatura 20 °C , após estabilização, sem vento.

Para cada exemplo, traduzindo uma combinação de tipo de condutor e parâmetro c , considerou-se quatro valores de vão.

Em todos os exemplos admitiu-se condutor com superfície envelhecida e condições atmosféricas idênticas, correspondentes, nomeadamente, a: ar a 40 °C , vento ortogonal ao condutor com velocidade 0,6 m/s , radiação solar direta ortogonal ao condutor com intensidade 1 kW/m² , e várias hipóteses adicionais que considere razoáveis e não extremas.

Os resultados apresentados mostram claramente que, pelo menos para a grande maioria do território brasileiro, é irrealista considerar que haja linhas cuja temperatura máxima de operação, em regime permanente, seja 50 °C . Nos quatro exemplos, a temperatura do condutor, com corrente nula, excede 60 °C , para condições atmosféricas que não são excepcionais.

Os resultados mostram, também, que é muito afastada da realidade a hipótese de supor que a relação entre o fator de sobrecarga associado a determinado aumento de flecha (em relação a uma condição de projeto), depende apenas da temperatura máxima de projeto. Embora se trate apenas de quatro exemplos, com muitas condições análogas ou similares, a sensibilidade relativa da corrente em regime permanente ao acréscimo de flecha [1], para igual temperatura de projeto (suposta traduzir uma temperatura aproximadamente máxima, calculada corretamente) varia, nesses exemplos, numa gama relativa da ordem de um para três.

Noto que os cálculos que serviram de base aos resultados exemplificativos apresentados foram efetuados considerando diretamente modelos físicos básicos dos fenômenos envolvidos, abstraindo, deliberadamente, de quaisquer critérios de tipo “norma”.

[1] Definindo essa sensibilidade relativa, S , por

$$S = \frac{\partial I}{\partial \Delta F}$$

sendo:

I corrente em regime permanente, com temperatura estabilizada

ΔF acréscimo de flecha, em relação a uma condição de referência, tomada como base de projeto.

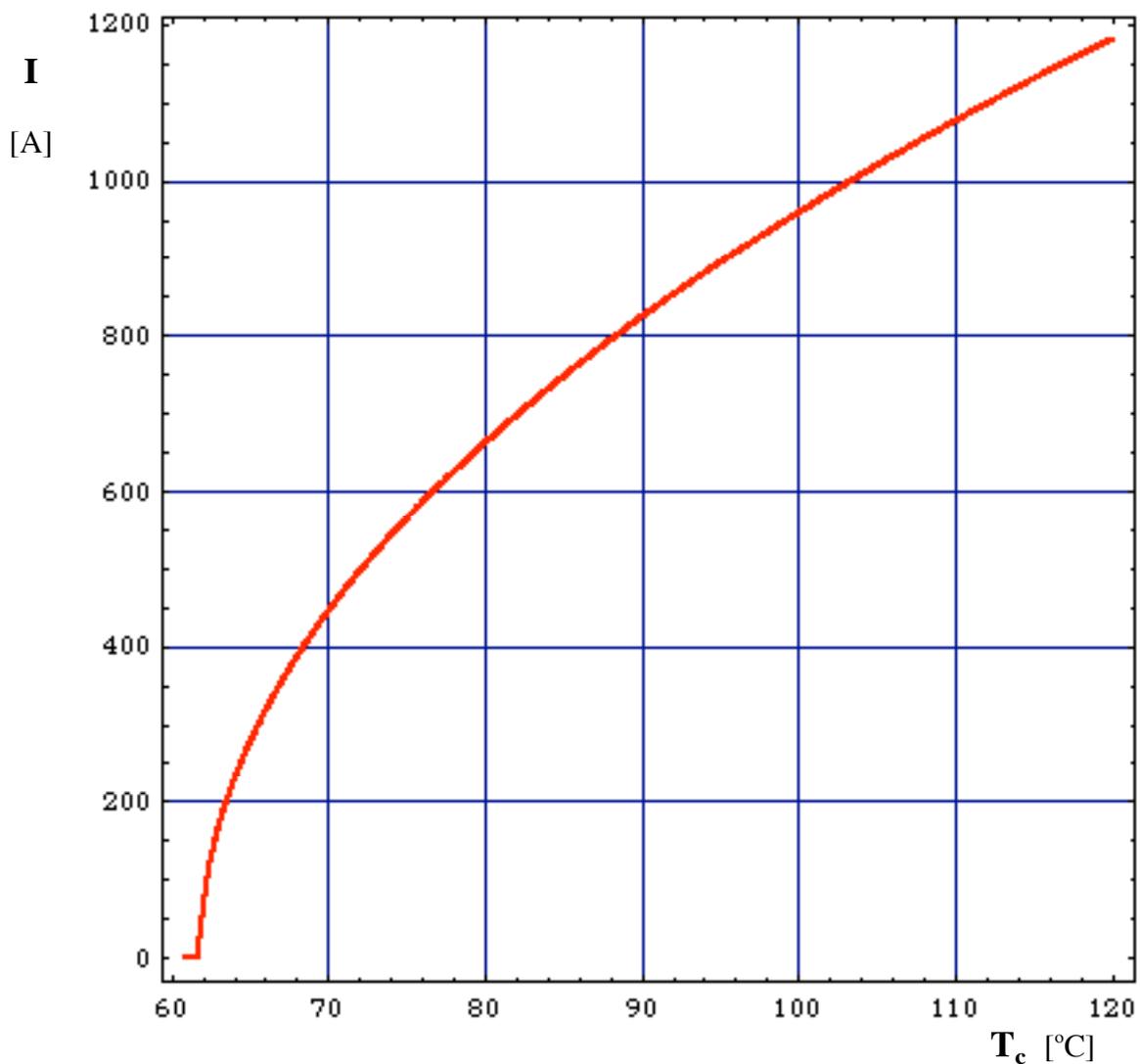


Fig. 1 - Relação entre a temperatura do condutor, T_c , e a corrente em regime permanente, I , nas condições atmosféricas consideradas, nos exemplos 1 e 2. A temperatura do condutor, com corrente nula, é $61,9$ °C.

Cabo *Rail*, com superfície envelhecida. Condições atmosféricas correspondentes, nomeadamente, a: ar a 40 °C, vento ortogonal ao condutor com velocidade $0,6$ m/s, radiação solar direta ortogonal ao condutor com intensidade 1 kW/m².

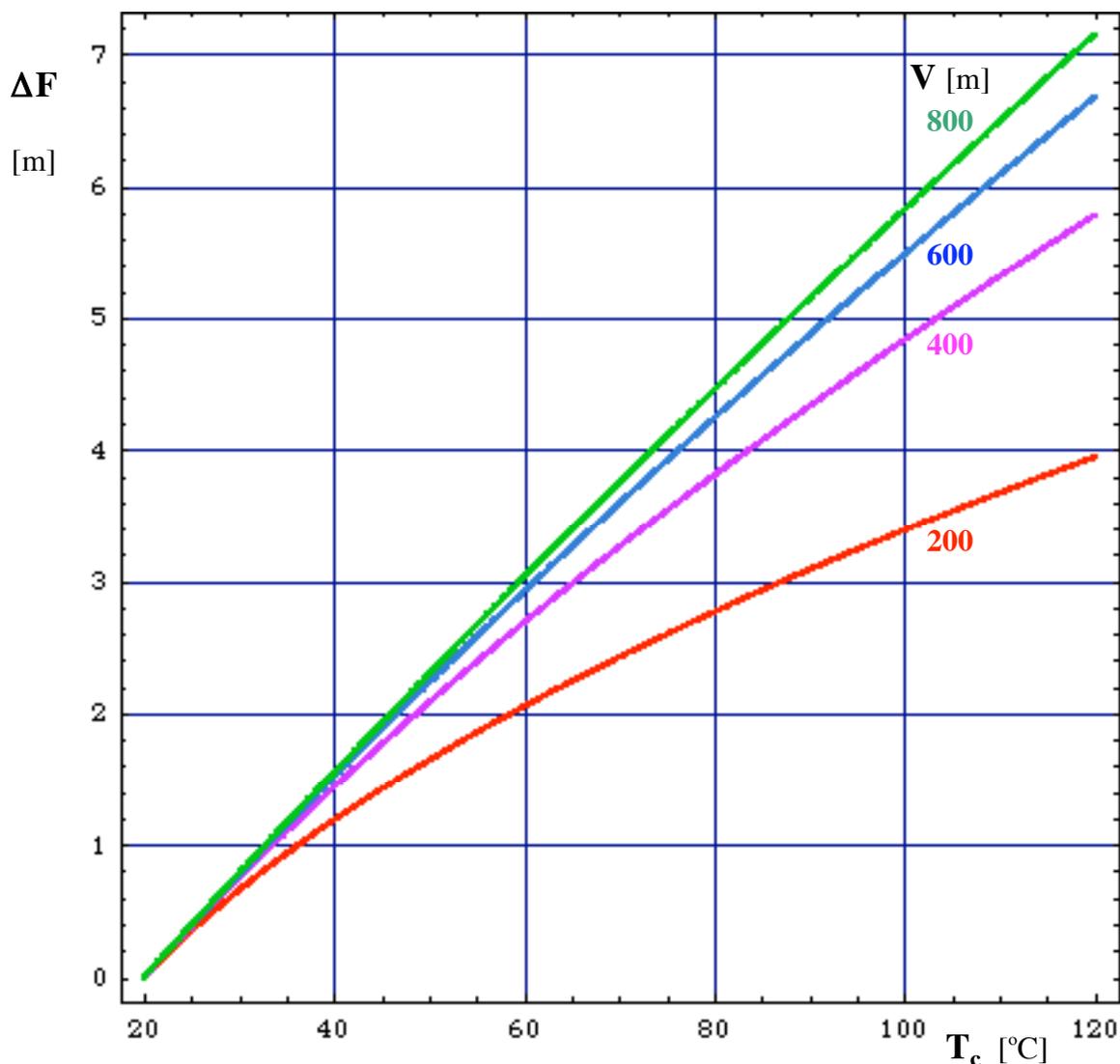


Fig. 2 - Relação entre a temperatura do condutor, T_c , e o acréscimo de flecha, ΔF , em relação à condição de referência de montagem do cabo, para diferentes valores de vão, V , nas condições consideradas, no exemplo 1.

O acréscimo de flecha, ΔF , é definido em relação a uma condição de referência de montagem do cabo, correspondente a temperatura 20°C , após estabilização, sem vento, parâmetro da catenária $c = 2500$ m, extremidades do vão à mesma cota, e flecha medida a meio do vão.

Cabo Rail.

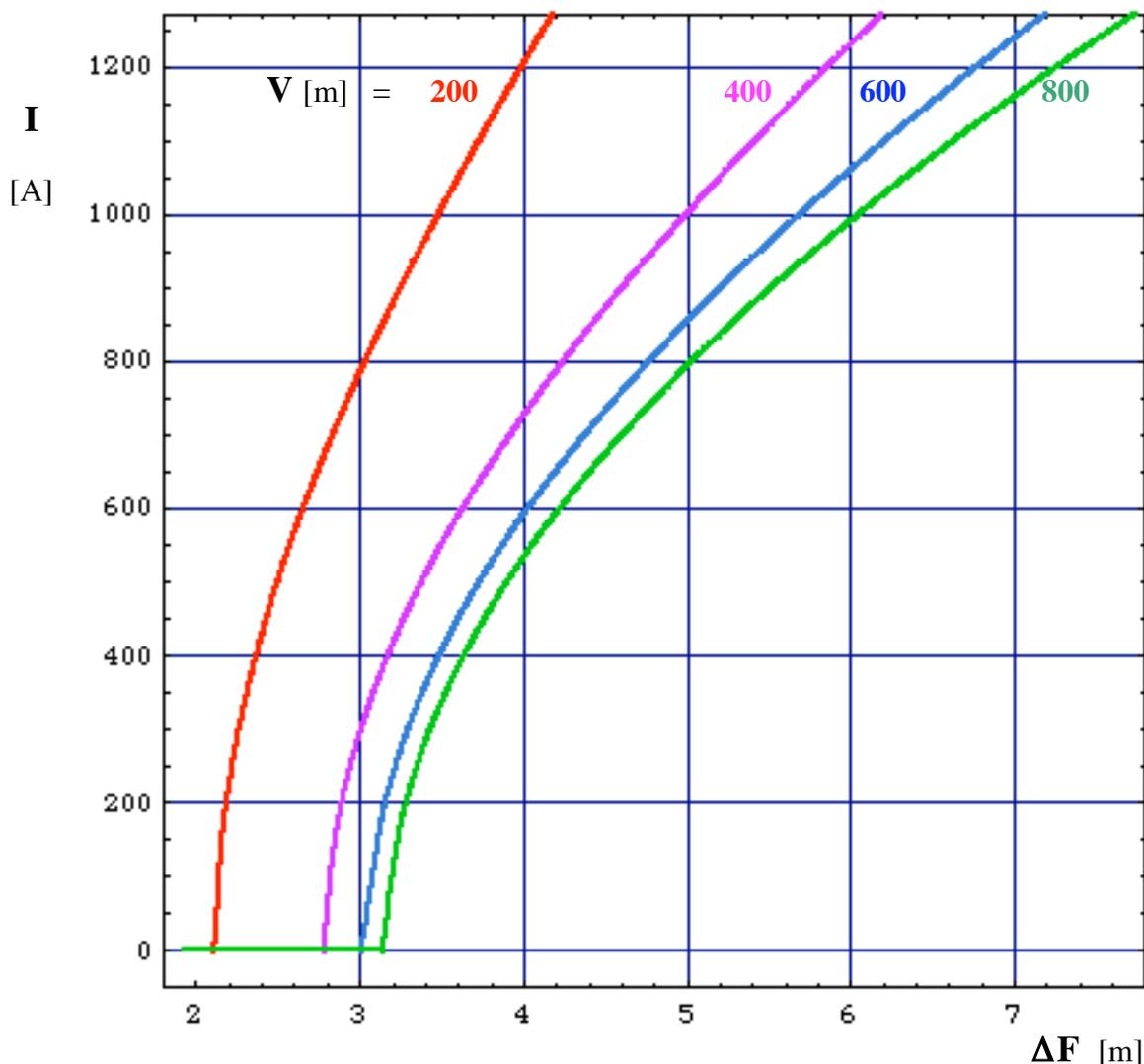


Fig. 3 - Relação entre o acréscimo de flecha, ΔF , em relação à condição de referência de montagem do cabo, e a corrente em regime permanente, I , para diferentes valores de vão, V , nas condições atmosféricas consideradas, no exemplo 1. A temperatura do condutor, com corrente nula, é 61,9 °C.

Cabo *Rail*, com superfície envelhecida. Condições atmosféricas correspondentes, nomeadamente, a: ar a 40 °C, vento ortogonal ao condutor com velocidade 0,6 m/s, radiação solar direta ortogonal ao condutor com intensidade 1 kW/m².

O acréscimo de flecha, ΔF , é definido em relação a uma condição de referência de montagem do cabo, correspondente a temperatura 20 °C, após estabilização, sem vento, parâmetro da catenária $c = 2500$ m, extremidades do vão à mesma cota, e flecha medida a meio do vão.

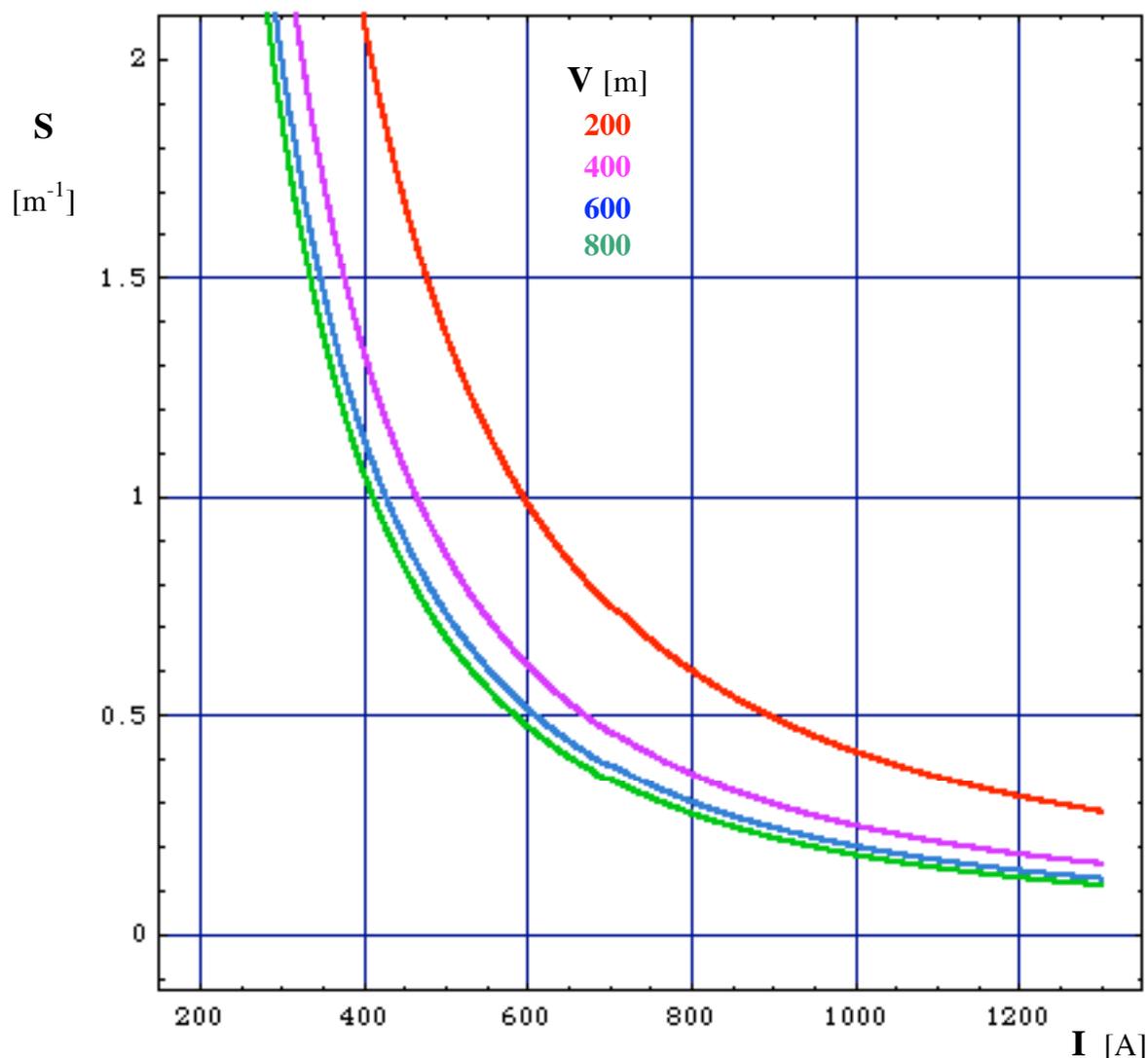


Fig. 4 - Relação entre a corrente em regime permanente, I , e a sensibilidade relativa da corrente em regime permanente ao acréscimo de flecha, $S = (\partial I / \partial \Delta F) / I$, para diferentes valores de vão, V , nas condições atmosféricas consideradas, no exemplo 1. A temperatura do condutor, com corrente nula, é $61,9^{\circ}\text{C}$.

Cabo *Rail*, com superfície envelhecida. Condições atmosféricas correspondentes, nomeadamente, a: ar a 40°C , vento ortogonal ao condutor com velocidade $0,6\text{ m/s}$, radiação solar direta ortogonal ao condutor com intensidade 1 kW/m^2 .

O acréscimo de flecha, ΔF , é definido em relação a uma condição de referência de montagem do cabo, correspondente a temperatura 20°C , após estabilização, sem vento, parâmetro da catenária $c = 2500\text{ m}$, extremidades do vão à mesma cota, e flecha medida a meio do vão.

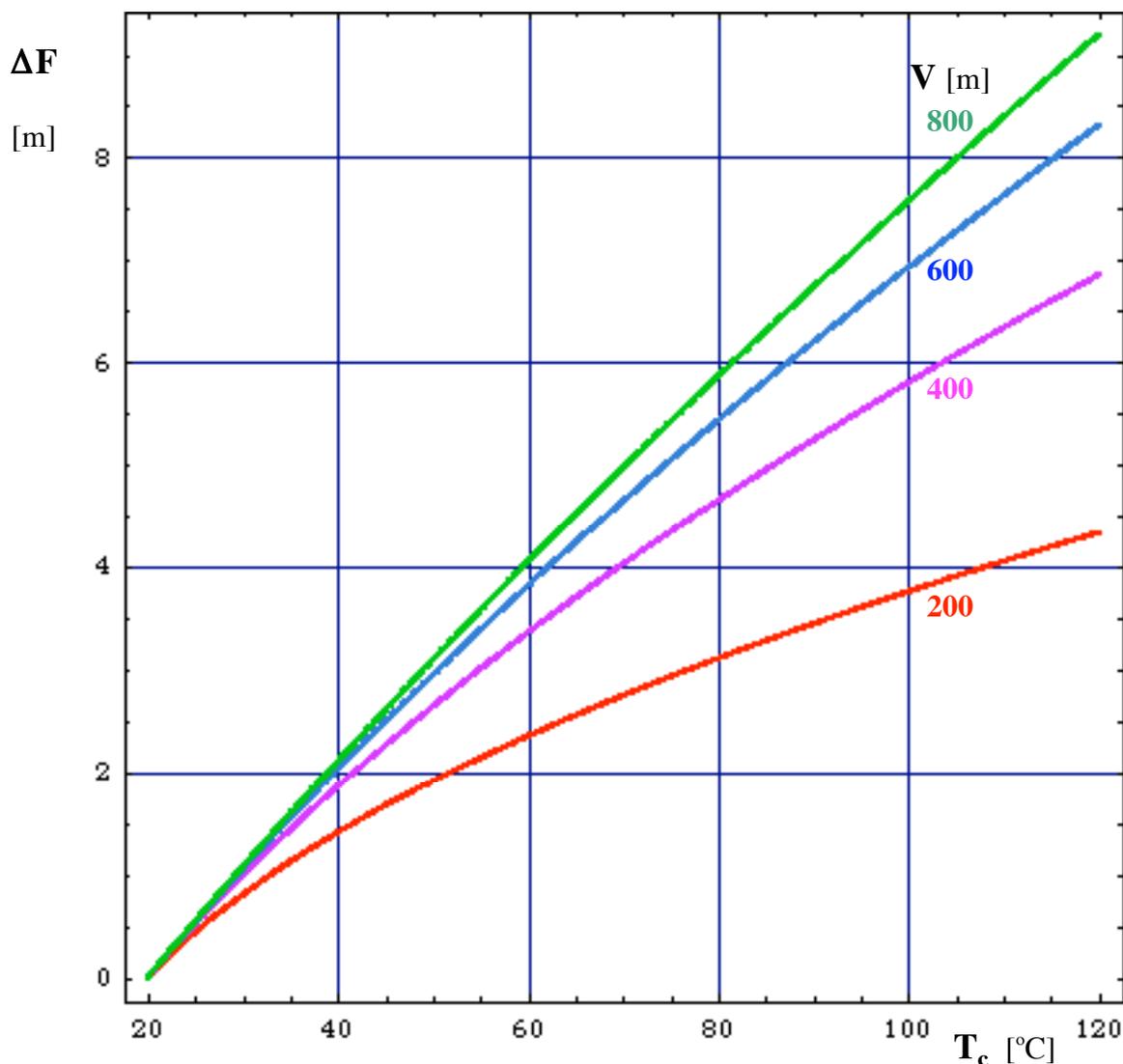


Fig. 5 - Relação entre a temperatura do condutor, T_c , e o acréscimo de flecha, ΔF , em relação à condição de referência de montagem do cabo, para diferentes valores de vão, V , nas condições consideradas, no exemplo 1.

O acréscimo de flecha, ΔF , é definido em relação a uma condição de referência de montagem do cabo, correspondente a temperatura 20 °C, após estabilização, sem vento, parâmetro da catenária $c = 3500$ m, extremidades do vão à mesma cota, e flecha medida a meio do vão.

Cabo Rail.

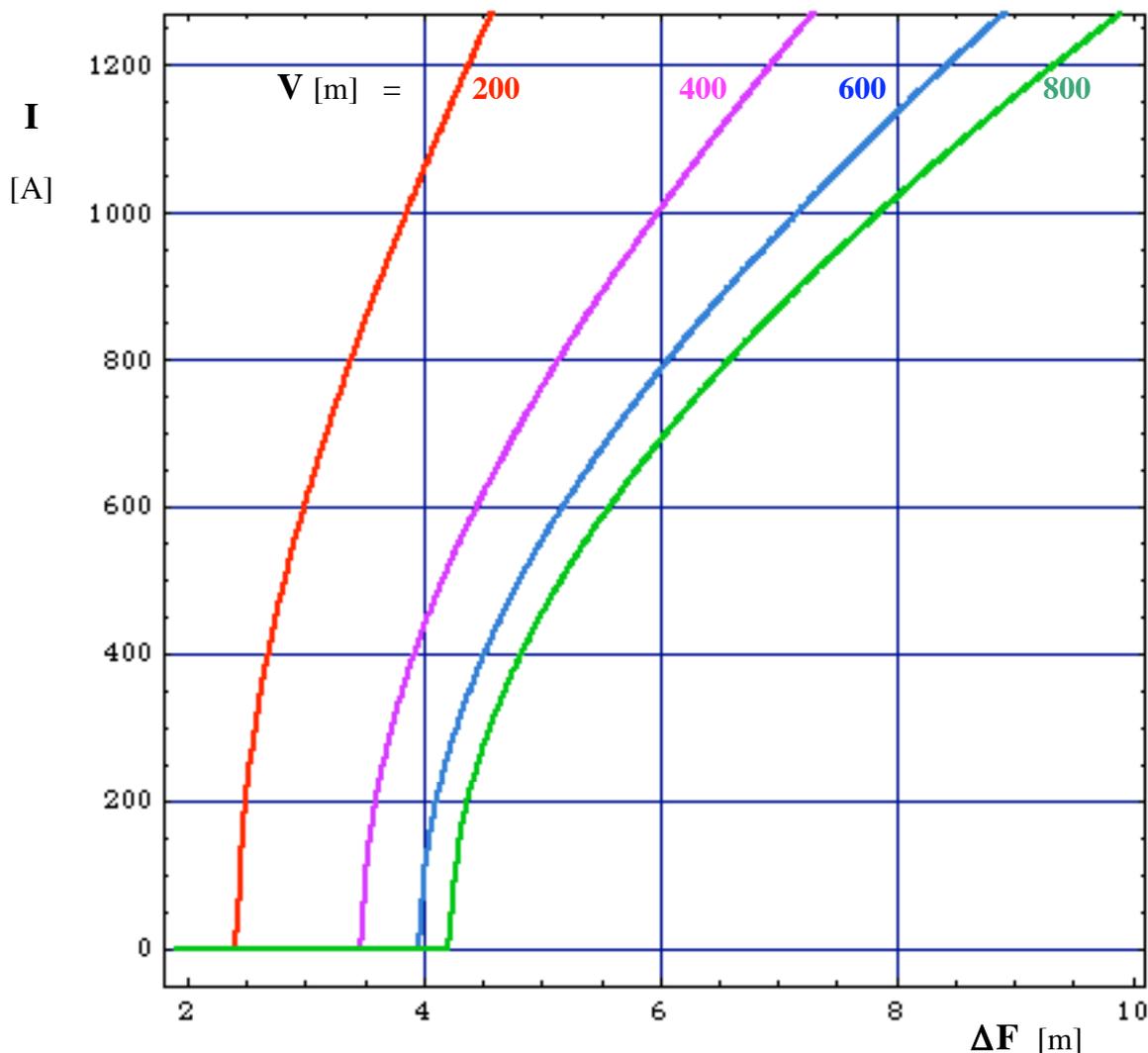


Fig. 6 - Relação entre o acréscimo de flecha, ΔF , em relação à condição de referência de montagem do cabo, e a corrente em regime permanente, I , para diferentes valores de vão, V , nas condições atmosféricas consideradas, no exemplo 2. A temperatura do condutor, com corrente nula, é $61,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Cabo *Rail*, com superfície envelhecida. Condições atmosféricas correspondentes, nomeadamente, a: ar a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, vento ortogonal ao condutor com velocidade $0,6\text{ m/s}$, radiação solar direta ortogonal ao condutor com intensidade 1 kW/m^2 .

O acréscimo de flecha, ΔF , é definido em relação a uma condição de referência de montagem do cabo, correspondente a temperatura $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, após estabilização, sem vento, parâmetro da catenária $c = 3500\text{ m}$, extremidades do vão à mesma cota, e flecha medida a meio do vão.

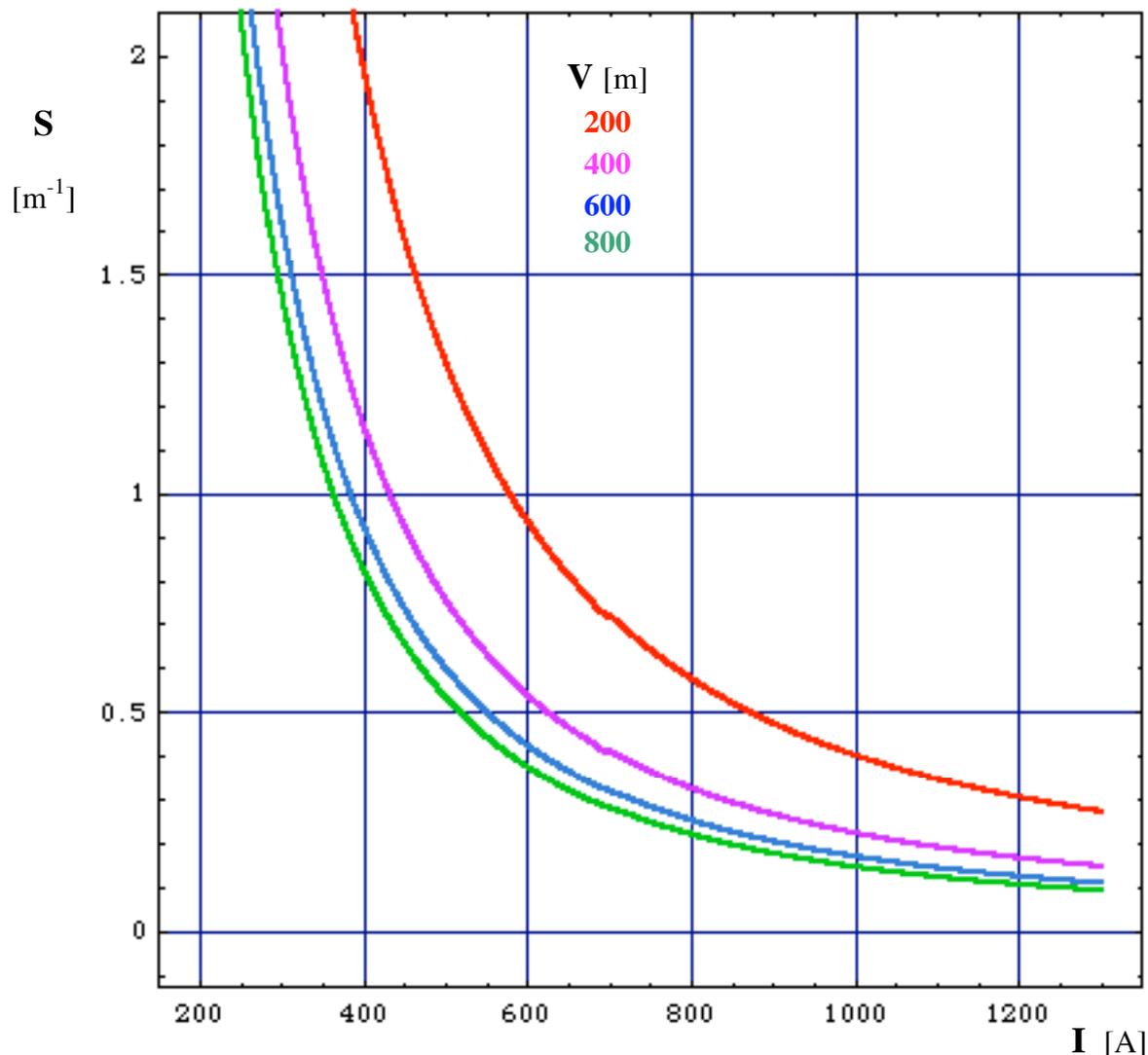


Fig. 7 - Relação entre a corrente em regime permanente, I , e a sensibilidade relativa da corrente em regime permanente ao acréscimo de flecha, $S = (\partial I / \partial \Delta F) / I$, para diferentes valores de vão, V , nas condições atmosféricas consideradas, no exemplo 2. A temperatura do condutor, com corrente nula, é $61,9^{\circ}C$.

Cabo *Rail*, com superfície envelhecida. Condições atmosféricas correspondentes, nomeadamente, a: ar a $40^{\circ}C$, vento ortogonal ao condutor com velocidade $0,6$ m/s, radiação solar direta ortogonal ao condutor com intensidade 1 kW/m².

O acréscimo de flecha, ΔF , é definido em relação a uma condição de referência de montagem do cabo, correspondente a temperatura $20^{\circ}C$, após estabilização, sem vento, parâmetro da catenária $c = 3500$ m, extremidades do vão à mesma cota, e flecha medida a meio do vão.

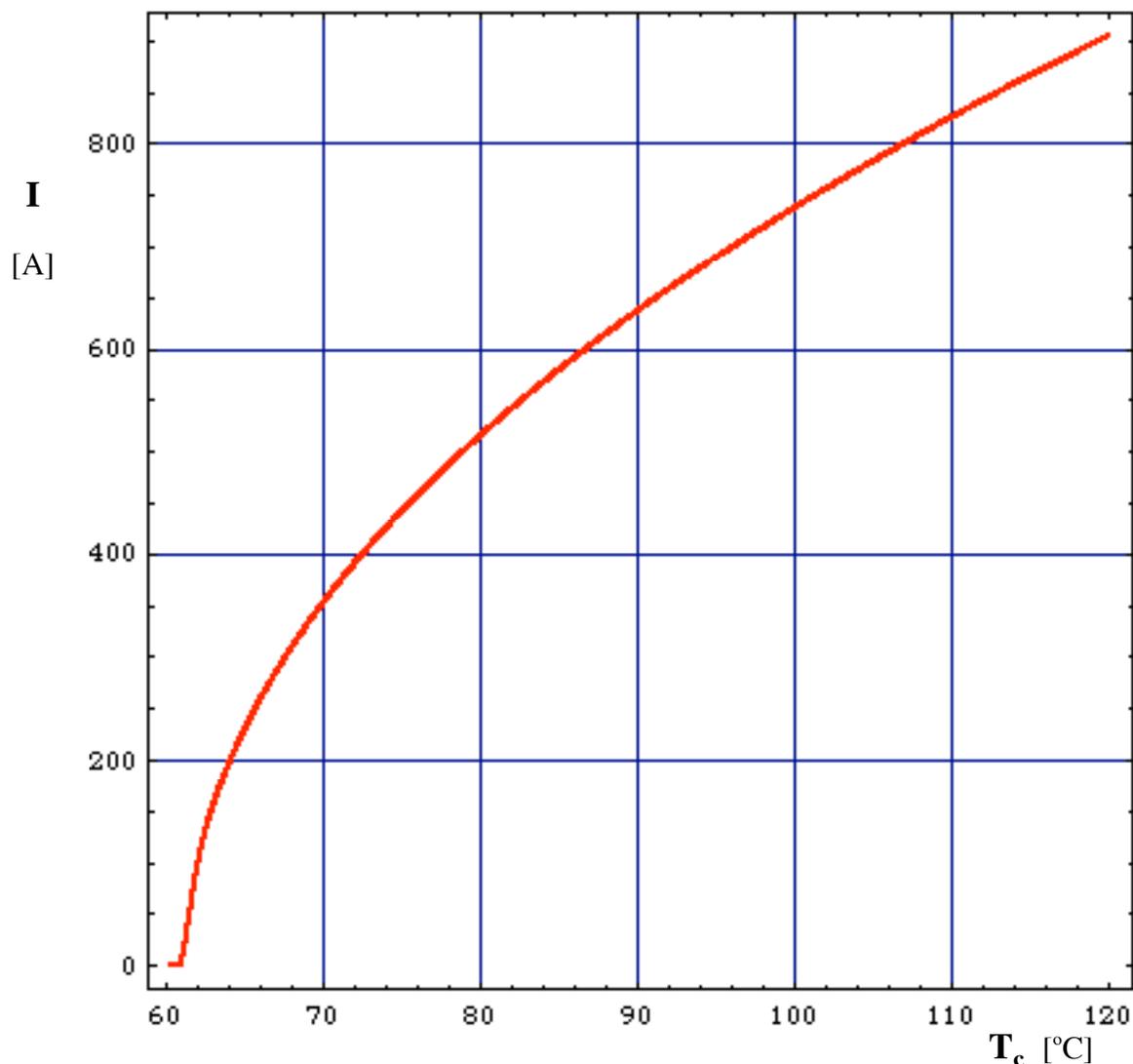


Fig. 8 - Relação entre a temperatura do condutor, T_c , e a corrente em regime permanente, I , nas condições atmosféricas consideradas, nos exemplos 3 e 4. A temperatura do condutor, com corrente nula, é 61,3 °C.

Cabo *Grosbeak*, com superfície envelhecida. Condições atmosféricas correspondentes, nomeadamente, a: ar a 40 °C, vento ortogonal ao condutor com velocidade 0,6 m/s, radiação solar direta ortogonal ao condutor com intensidade 1 kW/m².

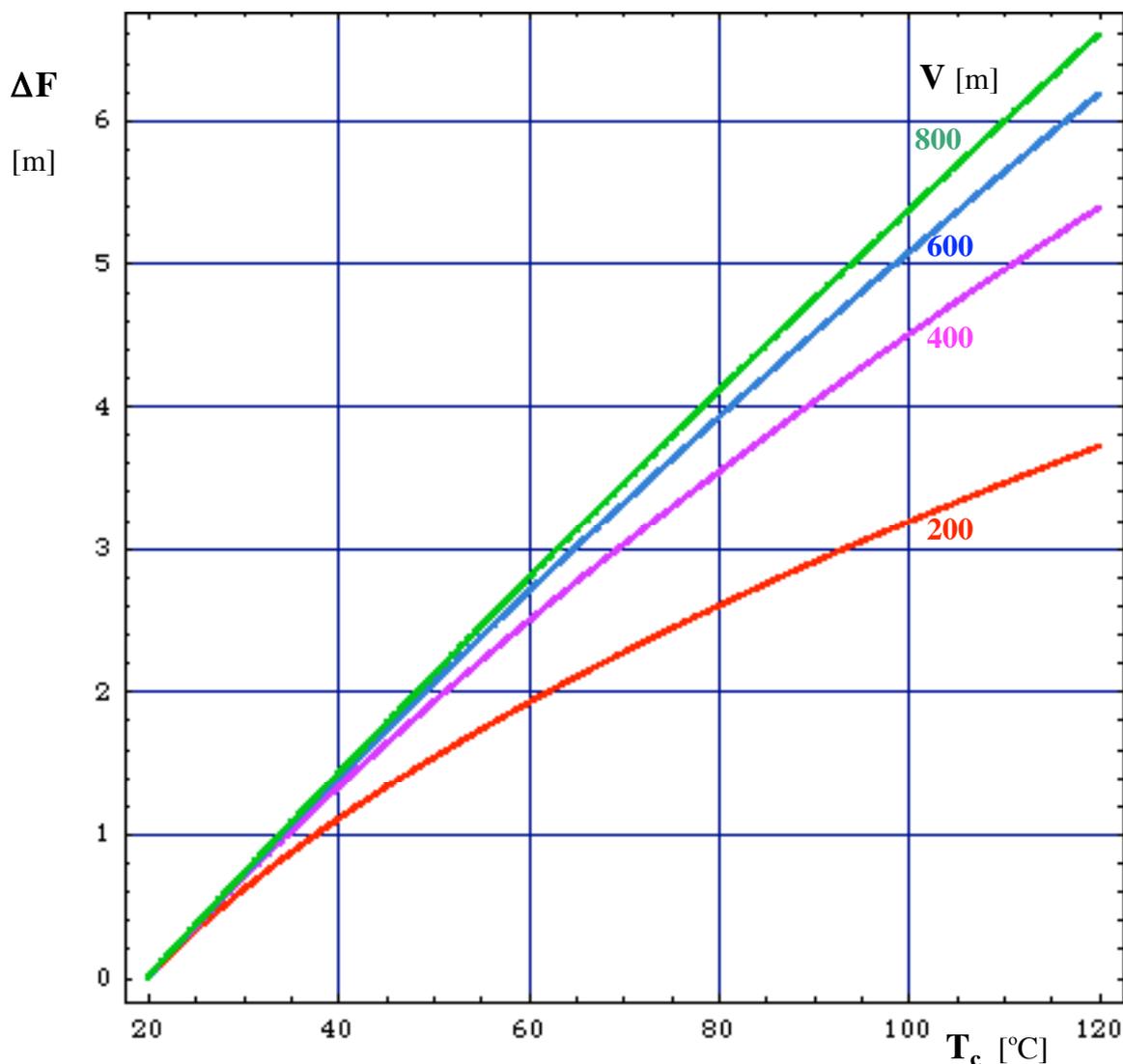


Fig. 9 - Relação entre a temperatura do condutor, T_c , e o acréscimo de flecha, ΔF , em relação à condição de referência de montagem do cabo, para diferentes valores de vão, V , nas condições consideradas, no exemplo 1.

O acréscimo de flecha, ΔF , é definido em relação a uma condição de referência de montagem do cabo, correspondente a temperatura 20°C , após estabilização, sem vento, parâmetro da catenária $c = 2500$ m, extremidades do vão à mesma cota, e flecha medida a meio do vão.

Cabo *Grosbeak*.

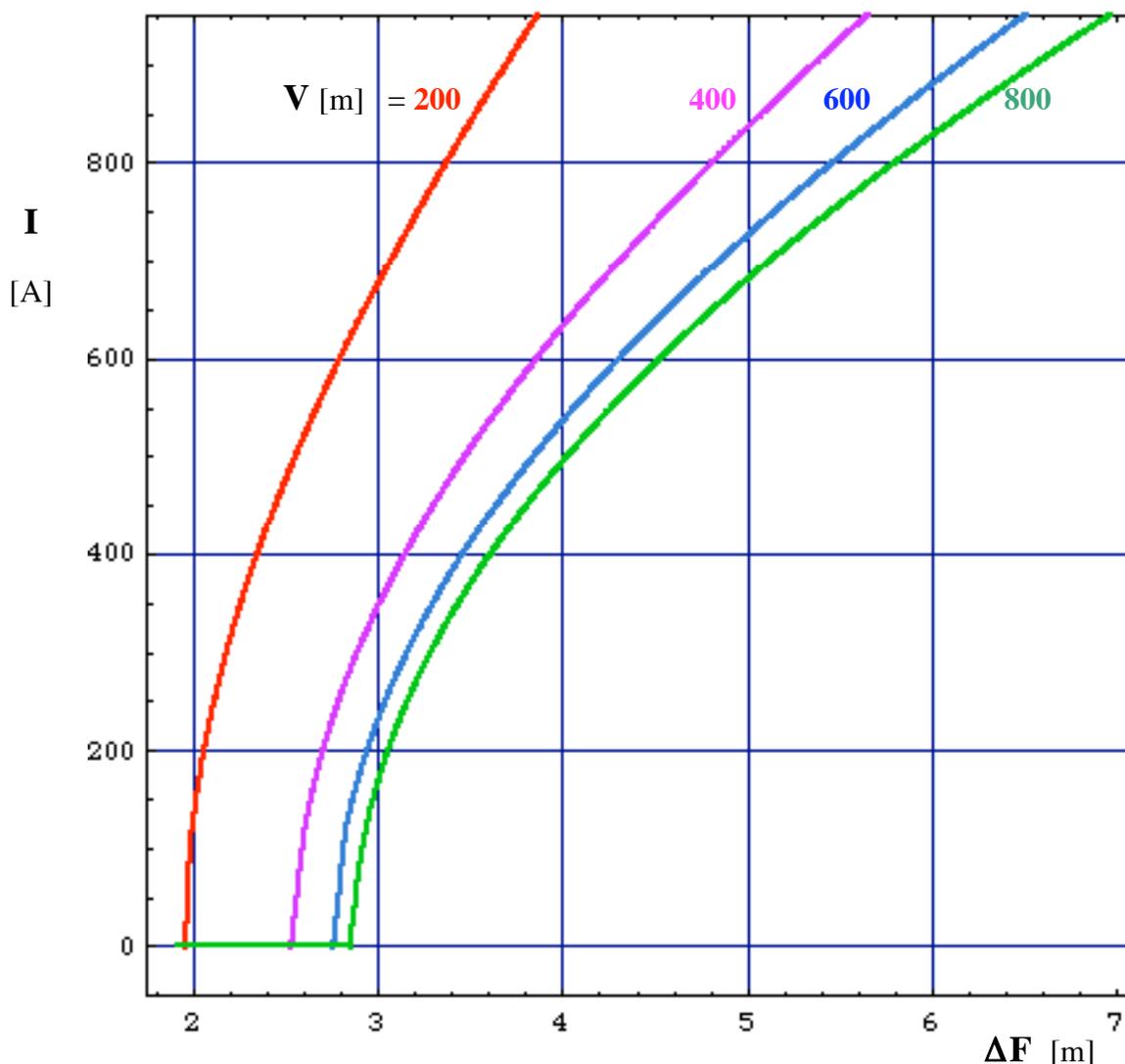


Fig. 10 - Relação entre o acréscimo de flecha, ΔF , em relação à condição de referência de montagem do cabo, e a corrente em regime permanente, I , para diferentes valores de vão, V , nas condições atmosféricas consideradas, no exemplo 1. A temperatura do condutor, com corrente nula, é 61,3 °C.

Cabo *Grosbeak*, com superfície envelhecida. Condições atmosféricas correspondentes, nomeadamente, a: ar a 40 °C, vento ortogonal ao condutor com velocidade 0,6 m/s, radiação solar direta ortogonal ao condutor com intensidade 1 kW/m².

O acréscimo de flecha, ΔF , é definido em relação a uma condição de referência de montagem do cabo, correspondente a temperatura 20 °C, após estabilização, sem vento, parâmetro da catenária $c = 2500$ m, extremidades do vão à mesma cota, e flecha medida a meio do vão.

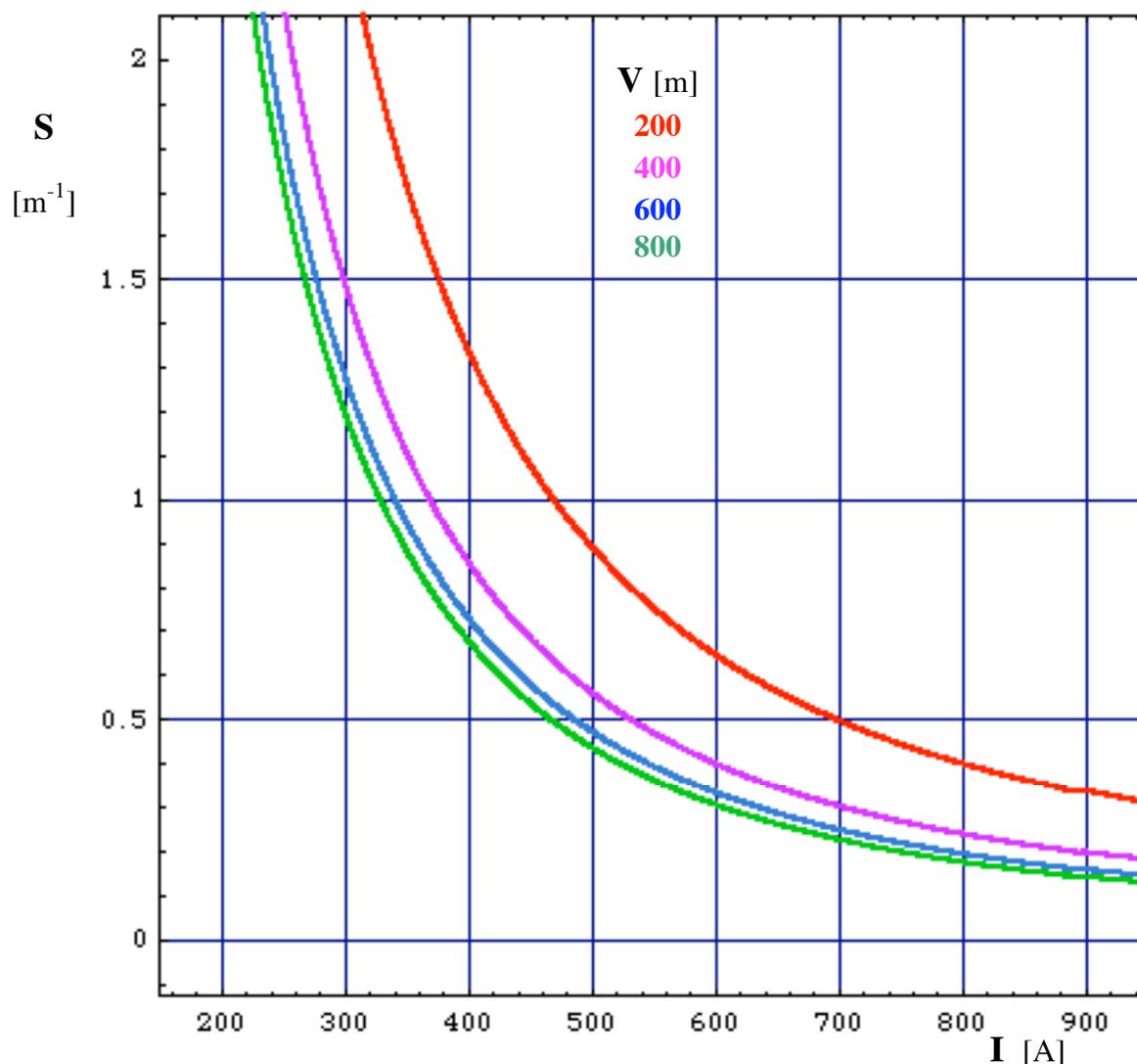


Fig. 11 - Relação entre a corrente em regime permanente, I , e a sensibilidade relativa da corrente em regime permanente ao acréscimo de flecha, $S = (\partial I / \partial \Delta F) / I$, para diferentes valores de vão, V , nas condições atmosféricas consideradas, no exemplo 3. A temperatura do condutor, com corrente nula, é $61,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Cabo *Grosbeak*, com superfície envelhecida. Condições atmosféricas correspondentes, nomeadamente, a: ar a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, vento ortogonal ao condutor com velocidade $0,6\text{ m/s}$, radiação solar direta ortogonal ao condutor com intensidade 1 kW/m^2 .

O acréscimo de flecha, ΔF , é definido em relação a uma condição de referência de montagem do cabo, correspondente a temperatura $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, após estabilização, sem vento, parâmetro da catenária $c = 2500\text{ m}$, extremidades do vão à mesma cota, e flecha medida a meio do vão.

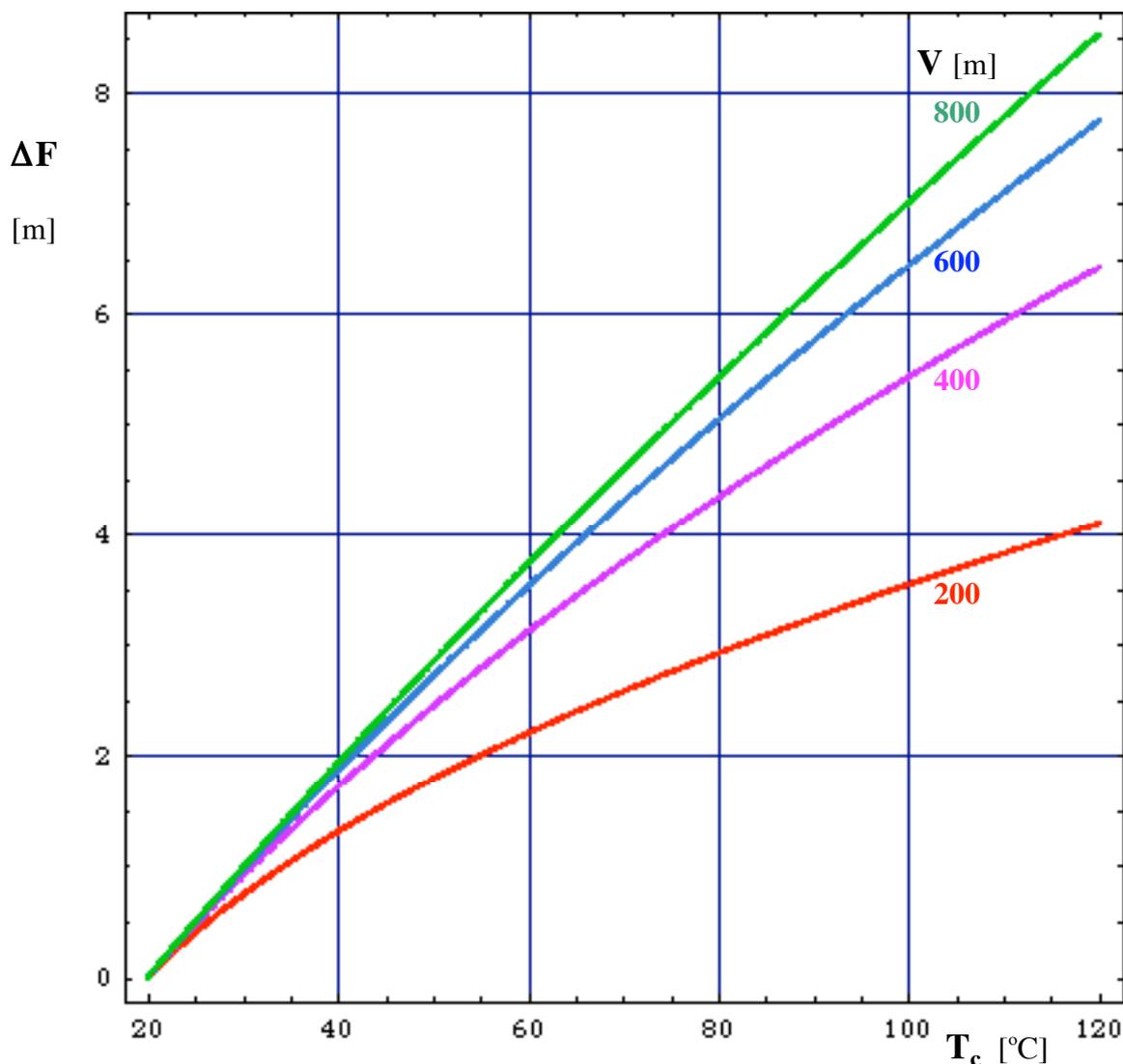


Fig. 12 - Relação entre a temperatura do condutor, T_c , e o acréscimo de flecha, ΔF , em relação à condição de referência de montagem do cabo, para diferentes valores de vão, V , nas condições consideradas, no exemplo 1.

O acréscimo de flecha, ΔF , é definido em relação a uma condição de referência de montagem do cabo, correspondente a temperatura 20 °C, após estabilização, sem vento, parâmetro da catenária $c = 3500$ m, extremidades do vão à mesma cota, e flecha medida a meio do vão.

Cabo *Grosbeak*.

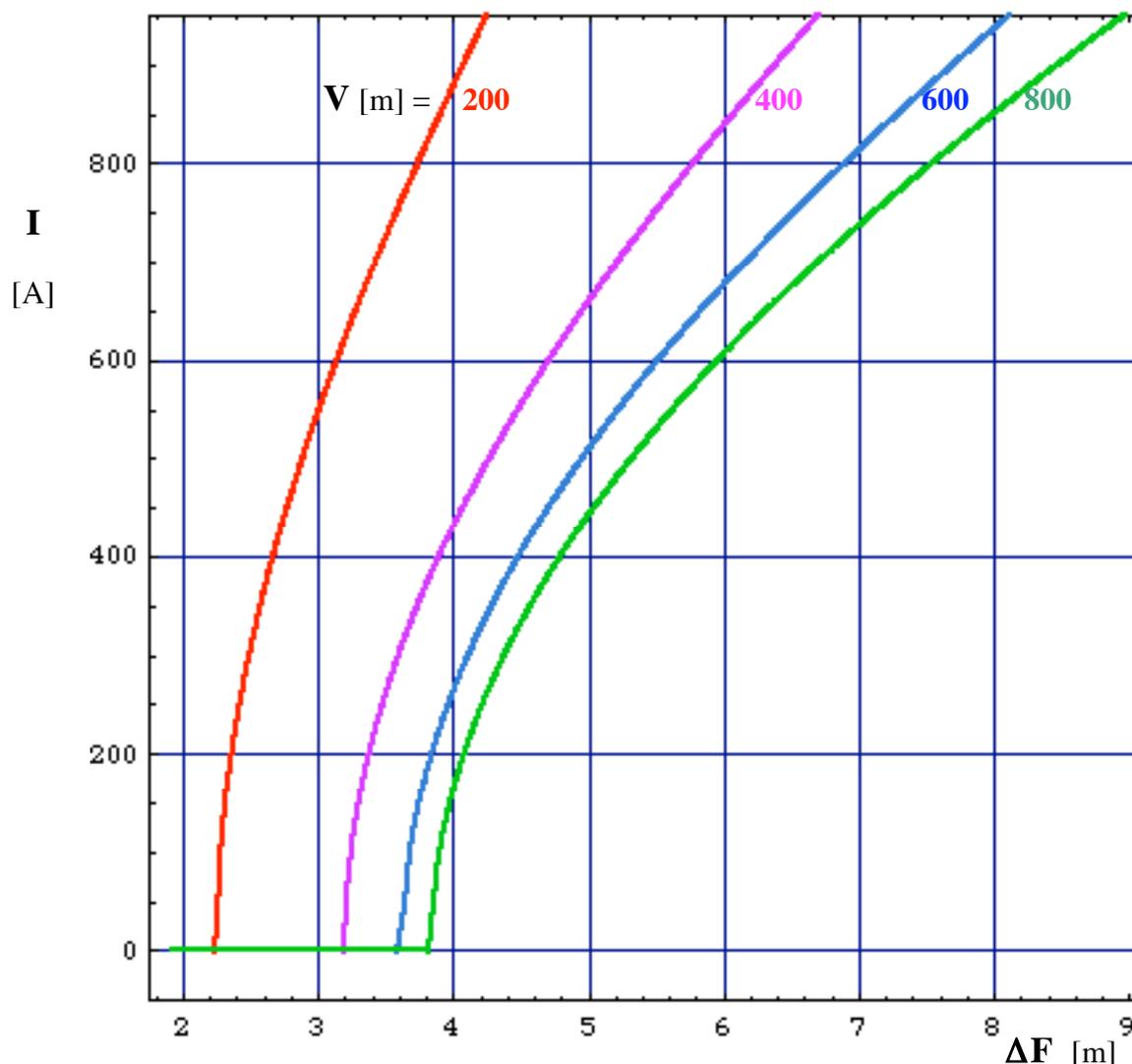


Fig. 13 - Relação entre o acréscimo de flecha, ΔF , em relação à condição de referência de montagem do cabo, e a corrente em regime permanente, I , para diferentes valores de vão, V , nas condições atmosféricas consideradas, no exemplo 4. A temperatura do condutor, com corrente nula, é $61,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Cabo *Grosbeak*, com superfície envelhecida. Condições atmosféricas correspondentes, nomeadamente, a: ar a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, vento ortogonal ao condutor com velocidade $0,6\text{ m/s}$, radiação solar direta ortogonal ao condutor com intensidade 1 kW/m^2 .

O acréscimo de flecha, ΔF , é definido em relação a uma condição de referência de montagem do cabo, correspondente a temperatura $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, após estabilização, sem vento, parâmetro da catenária $c = 3500\text{ m}$, extremidades do vão à mesma cota, e flecha medida a meio do vão.

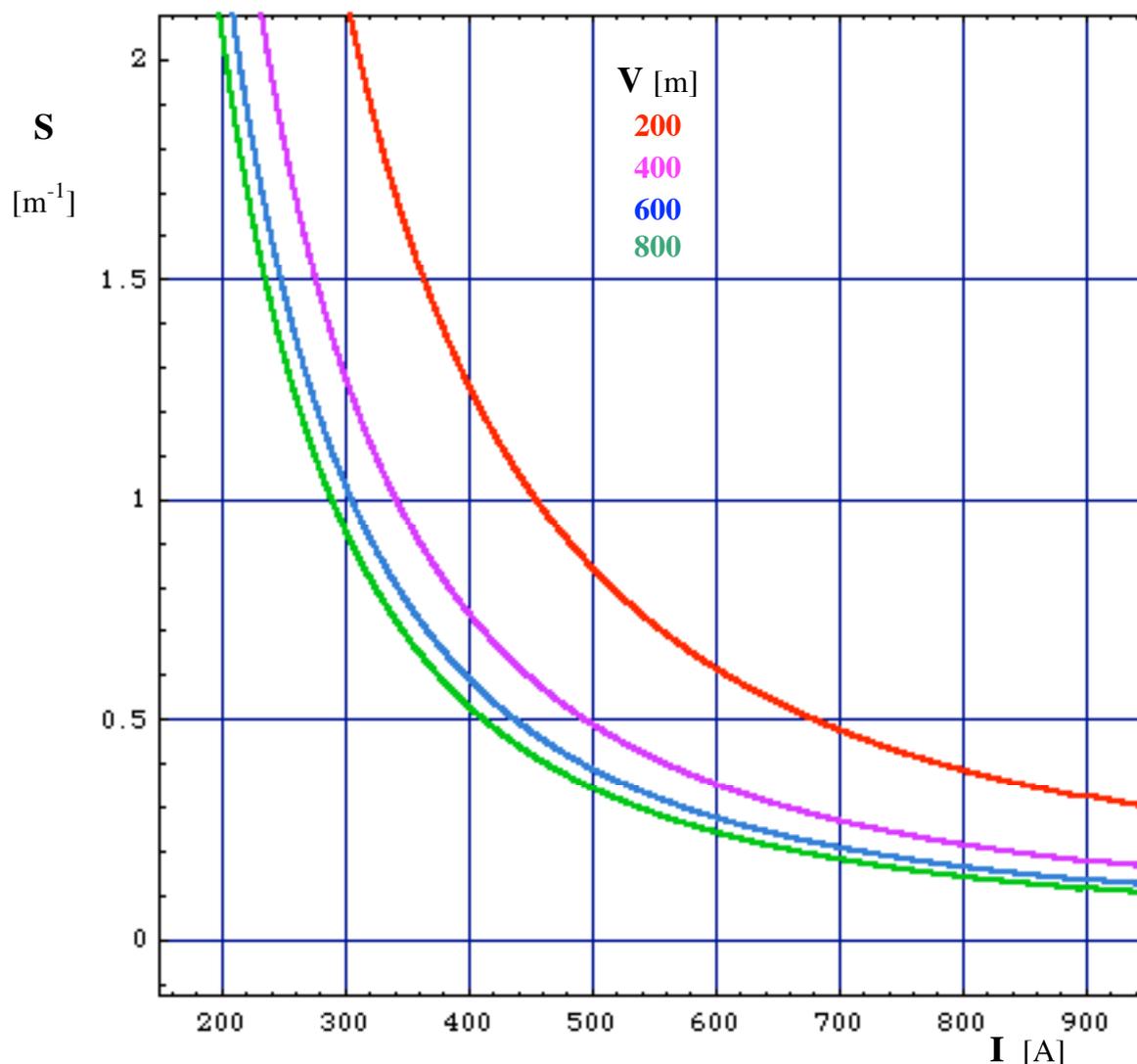


Fig. 14 - Relação entre a corrente em regime permanente, I , e a sensibilidade relativa da corrente em regime permanente ao acréscimo de flecha, $S = (\partial I / \partial \Delta F) / I$, para diferentes valores de vão, V , nas condições atmosféricas consideradas, no exemplo 4. A temperatura do condutor, com corrente nula, é $61,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Cabo *Grosbeak*, com superfície envelhecida. Condições atmosféricas correspondentes, nomeadamente, a: ar a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, vento ortogonal ao condutor com velocidade $0,6\text{ m/s}$, radiação solar direta ortogonal ao condutor com intensidade 1 kW/m^2 .

O acréscimo de flecha, ΔF , é definido em relação a uma condição de referência de montagem do cabo, correspondente a temperatura $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, após estabilização, sem vento, parâmetro da catenária $c = 3500\text{ m}$, extremidades do vão à mesma cota, e flecha medida a meio do vão.

Rio de Janeiro, 09/02/2005

Carlos Portela

Anexo 2

EXEMPLOS DE COMPORTAMENTO DE LINHAS PARA EVIDENCIAR CONDICIONAMENTOS DE APLICABILIDADE DA PROPOSTA DA ANEEL

Neste anexo apresenta-se um extrato de resultados de três exemplos de comportamento de linhas aéreas, quanto a relação entre a temperatura dos condutores após um curto-circuito, T_{c2} , e a corrente de curto-circuito, I , para diversos valores da temperatura do condutor antes do curto-circuito, T_{c1} , com o intuito de evidenciar condicionamentos de aplicabilidade da proposta da ANEEL.

Nestes exemplos considerou-se três tipos de condutores e duração de curto-circuito $\Delta t = 1$ s. Para diferentes valores de Δt , a relação entre T_{c2} e I pode ser obtida das figuras apresentadas considerando que, para igual temperatura do condutor antes do curto-circuito, T_{c1} , a temperatura T_{c2} é, praticamente, função de $I^2 \Delta t$. Desta forma, para $\Delta t \neq 1$ s, o valor de I é igual ao obtido no gráfico, para iguais valores de T_{c1} e T_{c2} , dividido por $\sqrt{\Delta t}$ (para Δt expresso em segundo).

Nota-se que, embora o curto-circuito tenha duração da ordem de 1 s, o arrefecimento subsequente é relativamente lento, e a flecha máxima atingida é aproximadamente igual à correspondente a regime permanente com temperatura igual a T_{c2} , e, até, um pouco mais elevada, devido à aceleração vertical do condutor ao atingir a flecha que corresponderia a equilíbrio à temperatura T_{c2} .

Os resultados apresentados mostram claramente que, pelo menos para grande parte das linhas, o aumento de flecha resultante de um curto-circuito pode ser da mesma ordem de grandeza do aumento de flecha resultante de sobrecarga. Para efetivamente se encarar com objetividade os condicionamentos de flecha, sob o ponto de vista de segurança real, há que levar em conta os curto-circuitos e os aspectos que os condicionam. Por exemplo, a corrente de curto-circuito varia muito acentuadamente ao longo da linha.

Noto que os cálculos que serviram de base aos resultados exemplificativos apresentados foram efetuados considerando diretamente modelos físicos básicos dos fenômenos envolvidos, abstraindo, deliberadamente, de quaisquer critérios de tipo “norma”.

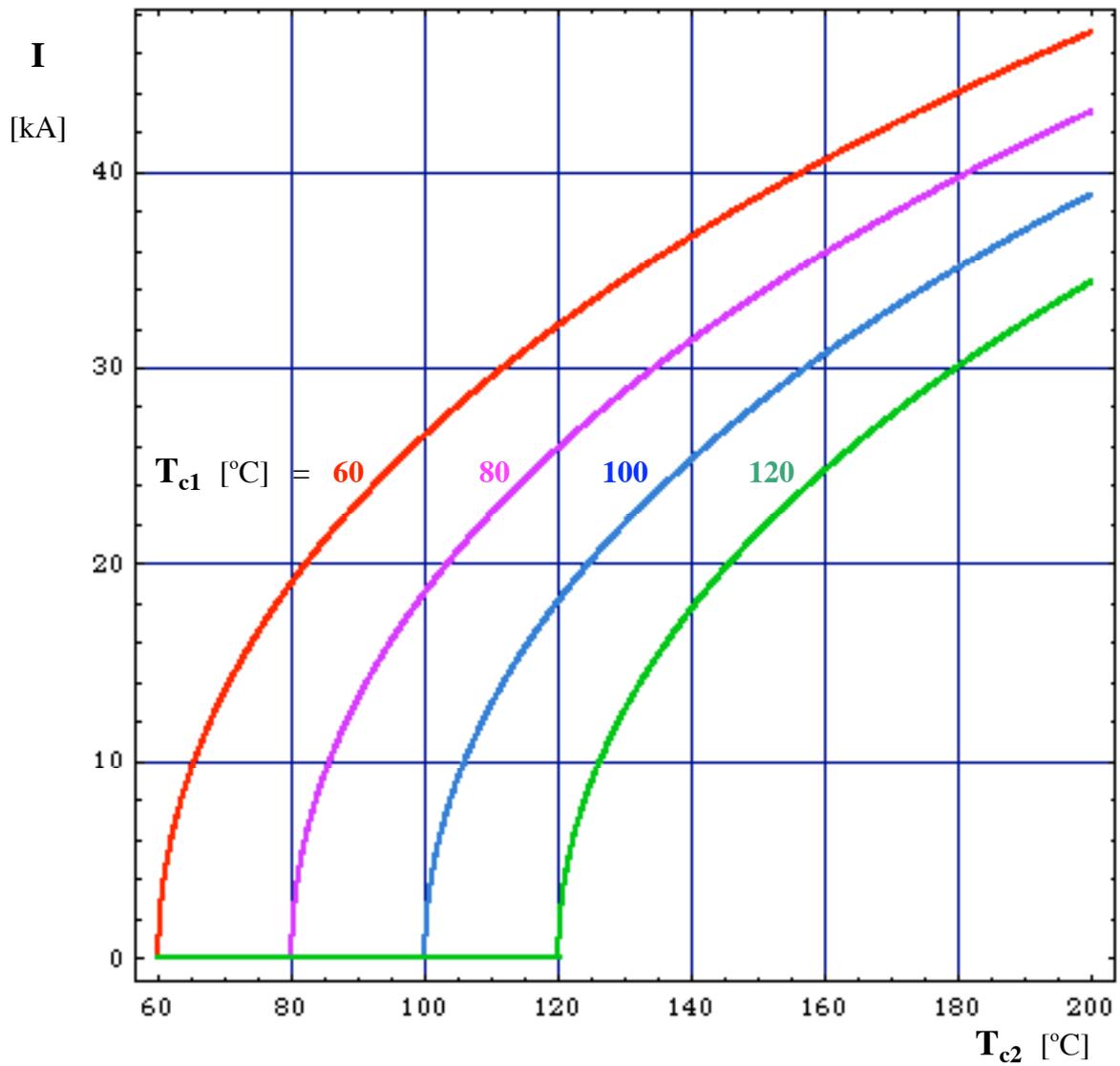


Fig. 1 - Relação entre a temperatura do condutor imediatamente após um curto-circuito, T_{c2} , e a corrente de curto-circuito no condutor, I , de duração $\Delta t = 1$ s, para diversos valores da temperatura do condutor antes do curto-circuito, T_{c1} , no exemplo 1.

Cabo Rail.

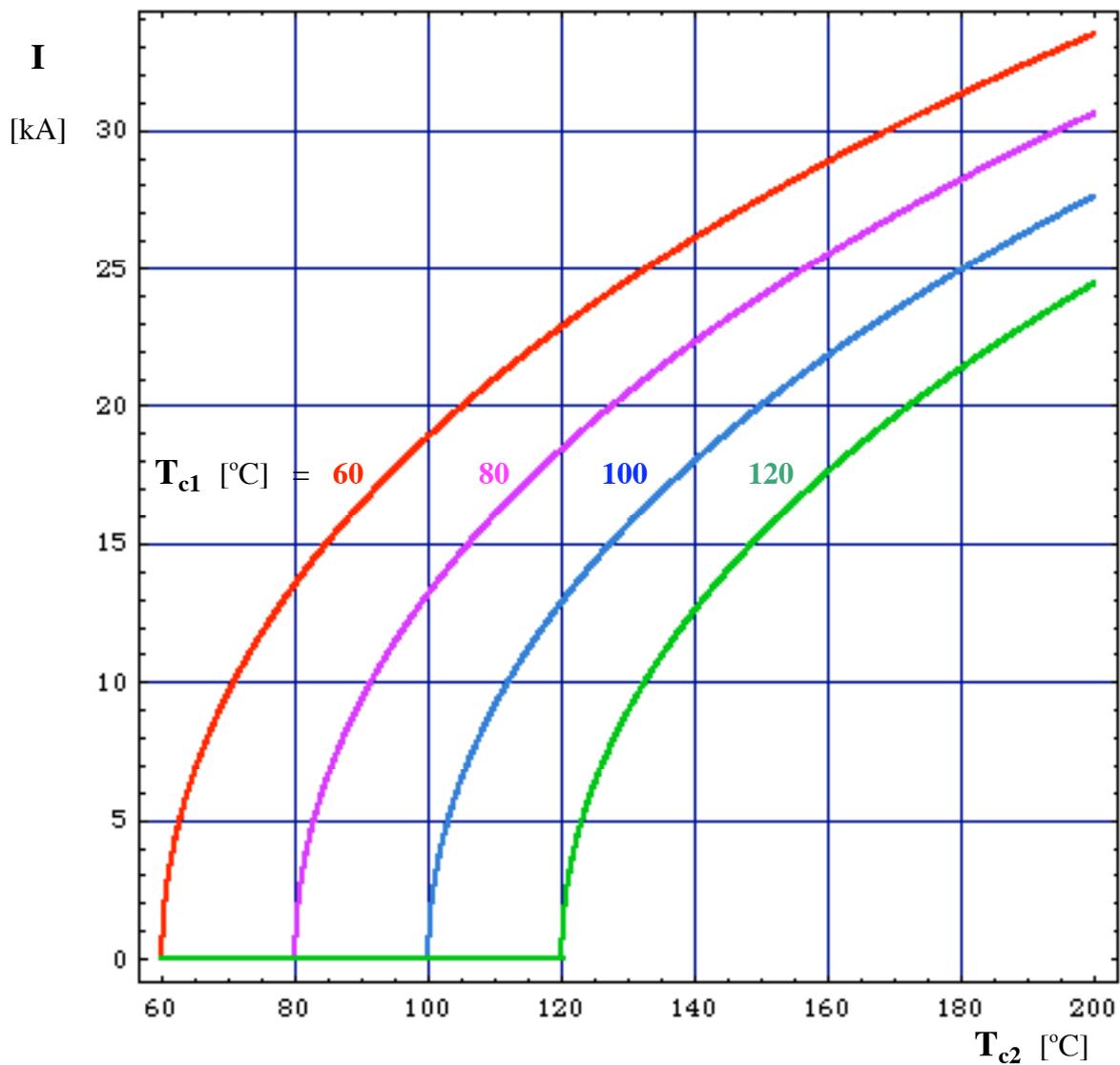


Fig. 2 - Relação entre a temperatura do condutor imediatamente após um curto-circuito, T_{c2} , e a corrente de curto-circuito no condutor, I , de duração $\Delta t = 1$ s, para diversos valores da temperatura do condutor antes do curto-circuito, T_{c1} , no exemplo 1.

Cabo *Grosbeak*.

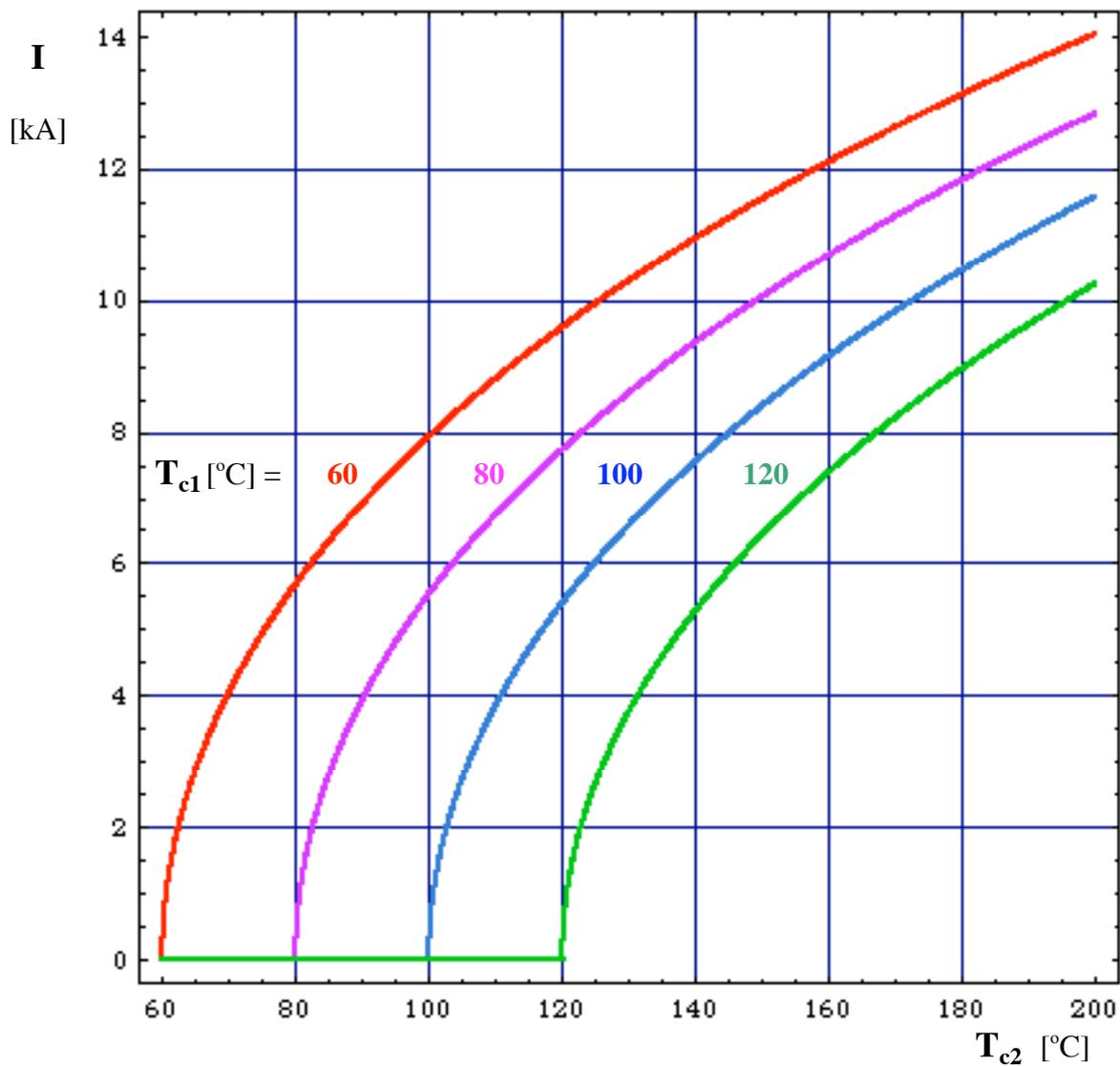


Fig. 3 - Relação entre a temperatura do condutor imediatamente após um curto-circuito, T_{c2} , e a corrente de curto-circuito no condutor, I , de duração $\Delta t = 1$ s, para diversos valores da temperatura do condutor antes do curto-circuito, T_{c1} , no exemplo 1.

Cabo *Partridge*.

Rio de Janeiro, 09/02/2005

Carlos Portela